

特 許 協 力 条 約

発信人 日本国特許庁（受理官庁）

出願人代理人

立石 篤司 殿

あて名

〒206-0035
日本国東京都多摩市唐木田1丁目53番地9
唐木田センタービル
立石国際特許事務所 FN101068

請求があった書類の送付
通知書

（法施行規則第37条）

〔PCT規則20.9〕

発送日（日．月．年）

16.02.2006

出願人又は代理人の書類記号

FN101068

国際出願に係る書類の謄本又は文献の写しを同封

国際出願番号

PCT/JP2001/11588

国際出願日（日．月．年）

27.12.01

出願人（氏名又は名称）

株式会社ニコン

受理官庁は、出願人から請求のあった「出願時の国際出願に係る書類の謄本又は手続の補完若しくは手続の補正に係る書類の謄本」又は「国際出願に係る文献の写し」を交付する。

受理官庁の名称及びあて名

日本国特許庁（RO/JP）

郵便番号100-8915 TEL03-3592-1308

日本国東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

様式PCT/RO/122（1992年7月）

権限のある職員

特 許 庁 長 官

特許協力条約に基づく国際出願願書

原本 (出願用) - 印刷日時 2001年12月27日 (27. 12. 2001) 木曜日 13時45分33秒

FN101068

0	受理官庁記入欄	
0-1	国際出願番号	PCT/JP01/11588
0-2	国際出願日	27.12.01
0-3	(受付印)	PCT International Application 日本国特許庁
0-4	様式-PCT/R0/101 この特許協力条約に基づく国際出願願書は、 右記によって作成された。	PCT-EASY Version 2.92 (updated 01.03.2001)
0-5	申立て 出願人は、この国際出願が特許協力条約に従って処理されることを請求する。	
0-6	出願人によって指定された受理官庁	日本国特許庁 (R0/JP)
0-7	出願人又は代理人の書類記号	FN101068
I	発明の名称	結像特性計測方法、結像特性調整方法、露光方法及び装置、プログラム及び記録媒体、並びにデバイス製造方法
II	出願人	出願人である (applicant only)
II-1	この欄に記載した者は	米国を除くすべての指定国 (all designated States except US)
II-2	右の指定国についての出願人である。	
II-4ja	名称	株式会社ニコン
II-4en	Name	NIKON CORPORATION
II-5ja	あて名:	100-8331 日本国 東京都 千代田区 丸の内3丁目2番3号
II-5en	Address:	2-3, Marunouchi 3-chome Chiyoda-ku, Tokyo 100-8331 Japan
II-6	国籍 (国名)	日本国 JP
II-7	住所 (国名)	日本国 JP
II-8	電話番号	03-3773-1342
II-9	ファクシミリ番号	03-3778-2900

特許協力条約に基づく国際出願願書

原本 (出願用) - 印刷日時 2001年12月27日 (27. 12. 2001) 木曜日 13時45分33秒

FNI01068

III-1	その他の出願人又は発明者	
III-1-1	この欄に記載した者は	出願人及び発明者である (applicant and inventor)
III-1-2	右の指定国についての出願人である。	米国のみ (US only)
III-1-4j a	氏名 (姓名)	塚越 敏雄
III-1-4e n	Name (LAST, First)	TSUKAKOSHI, Toshio
III-1-5j a	あて名:	100-8331 日本国 東京都 千代田区 丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内
III-1-5e n	Address:	c/o NIKON CORPORATION 2-3, Marunouchi 3-chome Chiyoda-ku, Tokyo 100-8331 Japan
III-1-6	国籍 (国名)	日本国 JP
III-1-7	住所 (国名)	日本国 JP
IV-1	代理人又は共通の代表者、通知のあて名 下記の者は国際機関において右記のごとく出願人のために行動する。	代理人 (agent)
IV-1-1ja	氏名 (姓名)	立石 篤司
IV-1-1en	Name (LAST, First)	TATEISHI, Atsuji
IV-1-2ja	あて名:	194-0013 日本国 東京都 町田市 原町田5丁目4番20号 パセオビル5階
IV-1-2en	Address:	Paseo Building 5th floor 4-20, Haramachida 5-chome Machida-shi, Tokyo 194-0013 Japan
IV-1-3	電話番号	042-739-6625
IV-1-4	ファクシミリ番号	042-739-6626
IV-1-5	電子メール	tatepat@blue.ocn.ne.jp
V	国の指定	
V-1	広域特許 (他の種類の保護又は取扱いを求める場合には括弧内に記載する。)	AP: GH GM KE LS MW MZ SD SL SZ TZ UG ZW 及びハラレプロトコルと特許協力条約の締約国である他の国 EA: AM AZ BY KG KZ MD RU TJ TM 及びユーラシア特許条約と特許協力条約の締約国である他の国 EP: AT BE CH&LI CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU MC NL PT SE TR 及びヨーロッパ特許条約と特許協力条約の締約国である他の国 OA: BF BJ CF CG CI CM GA GN GQ GW ML MR NE SN TD TG 及びアフリカ知的所有権機構と特許協力条約の締約国である他の国

特許協力条約に基づく国際出願願書

FN101068

原本（出願用） - 印刷日時 2001年12月27日 (27. 12. 2001) 木曜日 13時45分33秒

V-2	国内特許 (他の種類の保護又は取扱いを 求める場合には括弧内に記載す る。)	AE AG AL AM AT AU AZ BA BB BG BR BY BZ CA CH&LI CN CO CR CU CZ DE DK DM DZ EC EE ES FI GB GD GE GH GM HR HU ID IL IN IS JP KE KG KP KR KZ LC LK LR LS LT LU LV MA MD MG MK MN MW MX MZ NO NZ PH PL PT RO RU SD SE SG SI SK SL TJ TM TR TT TZ UA UG US UZ VN YU ZA ZW
V-5	指定の確認の宣言 出願人は、上記の指定に加えて 、規則4.9(b)の規定に基づき、 特許協力条約のもとで認められ る他の全ての国の指定を行う。 ただし、V-6欄に示した国の指 定を除く。出願人は、これらの 追加される指定が確認を条件と していること、並びに優先日から 15月が経過する前にその確認 がなされない指定は、この期間 の経過時に、出願人によって取 り下げられたものとみなされる ことを宣言する。	
V-6	指定の確認から除かれる国	なし (NONE)
VI-1	先の国内出願に基づく優先権 主張	
VI-1-1	出願日	2000年12月28日 (28. 12. 2000)
VI-1-2	出願番号	特願2000-402657
VI-1-3	国名	日本国 JP
VI-2	先の国内出願に基づく優先権 主張	
VI-2-1	出願日	2000年12月28日 (28. 12. 2000)
VI-2-2	出願番号	特願2000-402686
VI-2-3	国名	日本国 JP
VI-3	先の国内出願に基づく優先権 主張	
VI-3-1	出願日	2001年11月26日 (26. 11. 2001)
VI-3-2	出願番号	特願2001-359096
VI-3-3	国名	日本国 JP
VI-4	先の国内出願に基づく優先権 主張	
VI-4-1	出願日	2001年11月26日 (26. 11. 2001)
VI-4-2	出願番号	特願2001-359103
VI-4-3	国名	日本国 JP
VI-5	優先権証明書送付の請求 上記の先の出願のうち、右記の 番号のものについては、出願書 類の認証謄本を作成し国際事務 局へ送付することを、受理官庁 に対して請求している。	VI-1, VI-2, VI-3, VI-4
VII-1	特定された国際調査機関 (ISA)	日本国特許庁 (ISA/JP)

特許協力条約に基づく国際出願願書

原本 (出願用) - 印刷日時 2001年12月27日 (27. 12. 2001) 木曜日 13時45分33秒

VIII	申立て	申立て数	
VIII-1	発明者の特定に関する申立て	-	
VIII-2	出願し及び特許を与えられる国際出願日における出願人の資格に関する申立て	-	
VIII-3	先の出願の優先権を主張する国際出願日における出願人の資格に関する申立て	-	
VIII-4	発明者である旨の申立て (米国を指定国とする場合)	-	
VIII-5	不利にならない開示又は新規性喪失の例外に関する申立て	-	
IX	照合欄	用紙の枚数	添付された電子データ
IX-1	願書 (申立てを含む)	5	-
IX-2	明細書	68	-
IX-3	請求の範囲	11	-
IX-4	要約	1	fni01068c. txt
IX-5	図面	11	-
IX-7	合計	96	
	添付書類	添付	添付された電子データ
IX-8	手数料計算用紙	✓	-
IX-9	個別の委任状の原本	✓	-
IX-11	包括委任状の写し	✓	-
IX-17	PCT-EASYディスク	-	フロッピーディスク
IX-18	その他	納付する手数料に相当する特許印紙を貼付した書面	-
IX-18	その他	国際事務局の口座への振込みを証明する書面	-
IX-19	要約書とともに提示する図の番号	1	
IX-20	国際出願の使用言語名:	日本語	
X-1	提出者の記名押印		
X-1-1	氏名 (姓名)	立石 篤司	

受理官庁記入欄

T0-1	国際出願として提出された書類の実際の受理の日	27.12.01
T0-2	図面:	
10-2-1	受理された	
10-2-2	不足図面がある	
T0-3	国際出願として提出された書類を補完する書類又は図面であってその後期間内に提出されたものの実際の受理の日 (訂正日)	
T0-4	特許協力条約第11条(2)に基づく必要な補完の期間内の受理の日	
T0-5	出願人により特定された国際調査機関	ISA/JP
T0-6	調査手数料未払いにつき、国際調査機関に調査用写しを送付していない	

特許協力条約に基づく国際出願願書

FN101068

原本（出願用） - 印刷日時 2001年12月27日 (27. 12. 2001) 木曜日 13時45分33秒

国際事務局記入欄

II-1	記録原本の受理の日	
------	-----------	--

明 細 書

結像特性計測方法、結像特性調整方法、露光方法及び装置、プログラム及び記録媒体、並びにデバイス製造方法

技術分野

本発明は、結像特性計測方法、結像特性調整方法、露光方法及び装置、プログラム及び記録媒体、並びにデバイス製造方法に係り、更に詳しくは、投影光学系の目的とする結像特性を計測する結像特性計測方法、該結像特性を調整する結像特性調整方法、該結像特性調整方法によって結像特性が調整された投影光学系を用いて露光を行う露光方法及び前記結像特性調整方法を実施するのに適した露光装置、露光装置の制御用コンピュータに投影光学系の目的とする結像特性の算出あるいは投影光学系の結像特性調整のための処理を行わせるプログラム及びこれらのプログラムが記録されたコンピュータにより読み取り可能な情報記録媒体、並びに前記露光装置を用いるデバイス製造方法に関する。

背景技術

従来より、半導体素子又は液晶表示素子等をフォトリソグラフィ工程で製造する際に、フォトマスク又はレチクル（以下、「レチクル」と総称する）のパターンを、投影光学系を介して表面にフォトレジスト等の感光剤が塗布されたウエハ又はガラスプレート等の基板上に転写する投影露光装置、例えばステップ・アンド・リピート方式の縮小投影露光装置（いわゆるステッパ）や、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置（いわゆるスキャニング・ステッパ）等が用いられている。

ところで、半導体素子等を製造する場合には、異なる回路パターンを基板上に幾層にも積み重ねて形成する必要があるため、回路パターンが描画されたレ

チクルと、基板上の各ショット領域に既に形成されたパターンとを正確に重ね合わせる事が重要である。かかる重ね合せを精度良く行うためには、投影光学系の結像特性が所望の状態（例えば、基板上のショット領域（パターン）に対するレチクルパターンの転写像の倍率誤差などを補正するよう）に調整されることが必要不可欠である。なお、基板上の各ショット領域に第1層目のレチクルパターンを転写する場合にも、第2層目以降のレチクルパターンを精度良く各ショット領域に転写するために、投影光学系の結像特性を調整しておくことが望ましい。

この投影光学系の結像特性（光学特性の一種）の調整の前提として、結像特性を正確に計測（又は検出）する必要がある。この結像特性の計測方法として、所定の計測用パターンが形成された計測用マスクを用いて露光を行い、計測用パターンの投影像が転写形成された基板を現像して得られる転写像、例えばレジスト像を計測した計測結果に基づいて結像特性、具体的にはザイデルの5収差（ディストーション（歪曲収差）、球面収差、非点収差、像面湾曲、コマ収差）を算出する方法（以下、「焼き付け法」と呼ぶ）が、主として用いられている。この他、実際に露光を行うことなく、計測用マスクを照明光により照明し投影光学系によって形成された計測用パターンの空間像（投影像）を計測し、この計測結果に基づいて上記5収差を算出する方法（以下、「空間像計測法」と呼ぶ）も行われている。

しかるに、上述した焼き付け法、又は空間像計測法によると、上記5収差の全てを求めるためには、それぞれの計測に適したパターンを用いて、個別の計測を繰り返し行う必要がある。更に、計測される収差の種類及び大小によっては、その順番を考慮しなければ投影光学系を精度良く調整することは困難である。例えば、コマ収差が大きい場合、結像されるパターンが解像されず、この状態で、ディストーション、非点収差、及び球面収差などを計測しても正確なデータを得られない。従って、先にコマ収差がある程度以下となるように調整

した後、ディストーション等を計測する必要がある。

また、近時における半導体素子等の高集積化に伴い、回路パターンがますます微細化しており、最近ではザイデルの5収差（低次収差）を補正するのみでは、不十分であり、より高次の収差を含めた投影光学系の総合的な結像特性の調整が要求されるに至っている。このような総合的な結像特性を調整するためには、投影光学系を構成する個々のレンズエレメントのデータ（曲率、屈折率、厚さ等）を用いて光線追跡計算を行って、調整すべきレンズエレメント、及びその調整量を算出する必要がある。

しかるに、レンズエレメントのデータは、露光装置メーカーの極秘事項に属するため露光装置の修理又は調整を行うサービスエンジニア、あるいはユーザがこれ入手することは通常困難である。また、上記の光線追跡計算は膨大な時間を要するため、現場でサービスエンジニア等がこれを行うことは非現実的である。

また、投影光学系の各収差が、各種のパターンの結像特性に与える影響は一樣でなく、このため、露光装置のユーザの要求もその対象とするパターンによって異なることとなる。例えば、コンタクトホールパターンは、非点収差の影響が特に問題となる。また、細い線幅のラインアンドスペースパターンは、コマ収差の影響を大きく受ける。また、例えば、孤立線パターンとラインアンドスペースパターンとでは、ベストフォーカス位置が異なる。

このような背景の下、半導体製造工場内のオペレータ等が、投影光学系の結像特性（光学特性の一種）、特に対象とするパターンを基板上に精度良く転写するために特に影響が大きいと予想される結像特性を、簡易にかつ高精度に計測できる新たな技術や、半導体製造工場内等でサービスエンジニア等が、投影光学系の結像特性を比較的容易にかつ高精度に調整することを可能とする新たな技術などの出現が期待されていた。

本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、投影光学

系の目的とする結像特性を簡易かつ正確に計測することを可能とする結像特性計測方法を提供することにある。

本発明の第2の目的は、投影光学系の結像特性を容易にかつ高精度に調整することができる結像特性調整方法を提供することにある。

本発明の第3の目的は、微細パターンを基板上に精度良く形成することが可能な露光方法を提供することにある。

本発明の第4の目的は、マスクのパターンを基板上に精度良く転写することができる露光装置を提供することにある。

本発明の第5の目的は、デバイスの生産性の向上に寄与するデバイス製造方法を提供することにある。

本発明の第6の目的は、前記各露光装置での使用に好適なプログラム及び該プログラムが記録されたコンピュータによる読み取りが可能な情報記録媒体を提供することにある。

発明の開示

本発明は、第1の観点からすると、投影光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法であって、前記投影光学系の視野内の少なくとも1つの計測点で前記投影光学系の波面収差を計測する工程と；前記計測された波面収差と、予め用意された目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて前記目的とする結像特性を算出する工程と；を含む結像特性計測方法である。

ここで、「目的とする結像特性」とは、目的とする結像特性及びその結像特性の指標値の両者を含む概念である。本明細書においては、かかる意味で、目的とする結像特性なる用語を用いるものとする。

これによれば、投影光学系の視野内の少なくとも1つの計測点で投影光学系の波面収差を計測した後、計測した波面収差と予め用意された目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて前記目的とする結像特性を算出する。こ

のように、ツェルニケ変化表を予め用意しておくことにより、波面収差の計測を1度行うのみで、目的とする結像特性を算出することが可能となる。この場合、計測は、投影光学系の総合的な結像特性である波面収差について行われるので、目的の結像特性を精度良く求めることが可能となっている。

この場合において、前記算出する工程では、前記目的とする結像特性が、複数種類の結像特性を含む場合、前記計測された波面収差と前記複数種類の結像特性それぞれについてのツェルニケ変化表とに基づいて、前記目的とする結像特性に含まれる前記複数種類の結像特性をそれぞれ算出することとすることができる。

本発明の結像特性計測方法では、目的とする結像特性のツェルニケ変化表は、種々のパターンを考慮して種々の結像特性について、予め全く別に作成されることとしても良いし、あるいは前記計測する工程に先立って、前記投影光学系による投影の対象とするパターンの情報と、前記目的とする結像特性とに基づいてツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行うとともに、前記投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報に基づいて、前記収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する工程を更に含むこととしても良い。後者の場合において、前記投影光学系に関する情報には、前記投影光学系の開口数、照明条件、及び照明光の波長が含まれることとすることができる。

本発明の結像特性計測方法では、計測する工程に先立ってツェルニケ変化表を作成する場合、その作成する工程では、前記目的とする結像特性が、複数種類の結像特性を含む場合、前記複数種類の結像特性それぞれについての前記収差の情報に応じたツェルニケ変化表を作成することとすることができる。

本発明の結像特性計測方法では、前記算出された前記目的とする結像特性に関する情報を表示する工程を更に含むこととすることができる。

本発明は、第2の観点からすると、投影光学系の結像特性を調整する結像特

性調整方法であって、本発明の結像特性計測方法を用いて目的とする結像特性を計測する工程と；前記結像特性の計測結果に基づいて前記投影光学系を調整する工程と；を含む第1の結像特性調整方法である。

これによれば、本発明の結像特性計測方法を用いて目的とする結像特性を計測するので、その目的とする結像特性を精度良く求めることができる。そして、この求めた結像特性(結像特性の計測結果)に基づいて投影光学系を調整する。このため、投影光学系の目的とする結像特性を精度良く調整することができる。例えば、目的とする結像特性を、対象パターンの像の形成に特に影響を与える結像特性(収差)としておくことにより、投影光学系の結像特性を対象パターンに応じて可能な限り調整することが可能になる。

この場合において、前記投影光学系は、調整用の特定の光学素子を含む複数の光学素子を含んで構成され、前記投影光学系の調整は、前記計測された結像特性と、前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を演算により決定し、その決定された目標調整量に従って前記特定の光学素子を調整することにより行われることとすることができる。

本発明は、第3の観点からすると、調整用の特定の光学素子を含む複数の光学素子を含んで構成された投影光学系の結像特性を調整する結像特性調整方法であって、前記投影光学系の視野内の少なくとも1つの計測点で前記投影光学系を介した光情報を得て、前記投影光学系の結像特性を求める工程と；前記求めた結像特性と、前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を演算により決定する工程と；を含む第2の結像特性調整方法である。

ここで、「調整用の特定の光学素子」とは、結像特性の調整に用いられる特定

の光学素子を意味し、その特定の光学素子を駆動したり、交換したりすることにより投影光学系の結像特性を調整できる場合の他、その特定の光学素子を再加工あるいは交換して結像特性を調整する場合等をも含む。すなわち、調整用の特定の光学素子は、調整段階のみならず、製造段階においても用いられるものを含む。すなわち、調整用の特定の光学素子における「調整」とは、調整段階の結像特性の調整（補正）の他、結像特性が調整された投影光学系そのものを製造することをも含む。また、調整用の特定の光学素子は、1つに限らず、複数含まれていても良いことは勿論である。本明細書においては、かかる意味で「調整用の特定の光学素子」なる用語を用いている。

また、調整用の特定の光学素子が複数ある場合には、「目標調整量」は調整量がゼロ、すなわち何も調整をしない場合をも含む。本明細書では、かかる概念として、「目標調整量」という用語を用いている。

これによれば、投影光学系の調整の際には、投影光学系の視野内の少なくとも1つの計測点で投影光学系を介した光情報を得て、投影光学系の結像特性を求め、その求めた結像特性と、特定の光学素子の調整と投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、目標調整量を未知数として演算を行うことにより、その未知数、すなわち特定の光学素子の目標調整量を演算により決定する。このように、結像特性（収差）を実際に計測した計測結果と、特定の光学素子の調整と投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いることにより、その結像特性を補正する特定光学素子の目標調整量を容易に算出することができる。これにより投影光学系の結像特性を容易にかつ高精度に調整することが可能になる。

この場合において、前記結像特性を求める工程に先立って、前記パラメータ群を求める工程を更に含むこととすることができる。

本発明の第2の結像特性調整方法において、調整の対象となる結像特性は単

一種類の結像特性であることとすることもできるが、前記結像特性には、複数種類の結像特性が含まれていることとすることもできる。後者の場合、前記結像特性を求める工程では、複数種類の結像特性を求め、前記決定する工程では、前記求めた複数種類の結像特性と、前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を演算により決定することとすることができる。

本発明の第2の結像特性調整方法において、調整の対象となる結像特性は、種々の結像特性が考えられ、これに対応して前記関係式も種々の関係式が考えられる。例えば、前記結像特性はツェルニケ多項式で表される波面収差であることとすることができる。

この場合において、前記関係式は、前記ツェルニケ多項式の各項の係数の内の任意の項の係数に重み付けを行うための重み付け関数を含む式であることとすることができる。

本発明は、第4の観点からすると、マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光方法であって、本発明の第1、第2の結像特性調整方法のいずれかを用いて投影光学系の結像特性を調整する工程と；前記結像特性が調整された投影光学系を用いて前記パターンを基板上に転写する工程と；を含む露光方法である。

これによれば、本発明の第1、第2の結像特性調整方法のいずれかを用いて投影光学系の結像特性を調整し、その結像特性が調整された投影光学系を介してマスクのパターンを基板上に転写する。このため、結像特性が高精度に調整された投影光学系を介してマスクのパターンが基板上に転写されるので、微細パターンを精度良く基板上に形成することが可能になる。

特に、本発明の第1の結像特性調整方法によって投影光学系の結像特性を調整する場合、目的とする結像特性、例えば対象パターンの像の形成に特に影響

を与える結像特性（収差）を可能な限り調整する。従って、例えば対象パターンとして微細パターンが形成されているマスクを用いて露光を行う場合であっても、その微細パターンの像の形成に特に影響を与える結像特性（収差）を可能な限り調整した投影光学系を介してパターンが基板上に転写されることとなる。

本発明は、第5の観点からすると、マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、前記投影光学系を含む露光本体部に少なくともその一部が搭載可能で、前記投影光学系の波面収差を計測する計測装置と；前記計測装置により計測された前記投影光学系の波面収差と、目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて前記目的とする結像特性を算出する第1演算装置と；を備える第1の露光装置である。

これによれば、計測装置により投影光学系の波面収差が計測されると、第1の演算装置により、その計測された投影光学系の波面収差と、目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて前記目的とする結像特性が算出される。このように、ツェルニケ変化表を用いることにより、波面収差の計測を1度行うのみで、目的とする結像特性を算出することが可能となる。この場合、計測は、投影光学系の総合的な結像特性である波面収差について行われるので、目的とする結像特性を精度良く求めることが可能となっている。この精度良く求められた目的とする結像特性が最適となる（例えば目標値との差が最小となる）ように調整した状態で露光を行うことにより、マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に精度良く転写することが可能となる。

この場合において、前記ツェルニケ変化表が予め記憶された記憶装置を更に備えることとすることができる。

本発明の第1の露光装置では、前記ツェルニケ変化表は、対象とするパターンを焼き付けたときの与えられた収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表であることとすることができる。

本発明の第1の露光装置では、前記対象とするパターンの情報、前記目的とする結像特性の情報、前記投影光学系に関する情報、及び前記収差の情報を含む各種情報を入力するための入力装置と；前記入力装置を介して入力された対象とするパターンの情報及び目的とする結像特性の情報に基づいてツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行うとともに、前記入力装置を介して入力された前記投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報に基づいて、前記対象とするパターンを焼き付けたときの前記与えられた収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する第2演算装置と；を更に備えることとすることができる。

この場合において、前記投影光学系に関する情報には、前記投影光学系の開口数、照明条件、及び照明光の波長（中心波長及び波長幅など）が含まれることとすることができる。

本発明の第1の露光装置では、前記第1演算装置により算出された前記目的とする結像特性に関する情報を画面上に表示する表示装置を更に備えることとすることができる。

本発明の第1の露光装置では、前記第1演算装置による前記目的とする結像特性情報の算出結果に基づいて前記投影光学系の結像特性を補正する結像特性補正装置を更に備えることとすることができる。

この場合において、前記投影光学系は、調整用の特定の光学素子を含む複数の光学素子を含んで構成され、前記結像特性補正装置は、前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群が予め記憶された記憶装置と、前記算出された前記結像特性と前記パラメータ群と前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を算出する算出装置とを有することとすることができる。

本発明は、第6の観点からすると、マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、調整用の特定の光学素子を含

む複数の光学素子を含んで構成された前記投影光学系と；前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群が予め記憶された記憶装置と；前記投影光学系を含む露光本体部に少なくとも一部が搭載可能で前記投影光学系の結像特性を計測可能な計測装置と；前記計測装置で計測された実測データと前記パラメータ群と前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を算出する演算装置と；を備える第2の露光装置である。

これによれば、調整可能な特定の光学素子の調整と投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群が予め求められ、そのパラメータ群が記憶装置に予め記憶されている。そして、計測装置により投影光学系の結像特性が実測されると、演算装置により、前記結像特性の実測データと前記パラメータ群と特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、特定の光学素子の目標調整量が算出される。このように、上記のパラメータが予め求められ記憶装置に記憶されているので、実際に結像特性（収差）を計測した際には、その結像特性を補正する特定の光学素子の目標調整量を容易に算出することができ、この算出結果に基づいて特定の光学素子を調整することにより投影光学系の結像特性を容易にかつ高精度に調整することが可能になる。従って、この結像特性が高精度に調整された投影光学系を用いて露光を行うことにより、マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に精度良く転写することが可能となる。

この場合において、上記の算出された特定の光学素子の目標調整量に基づく調整は、オペレータによるマニュアル操作を介して行うこととすることもできるが、例えば前記算出された目標調整量に応じて前記特定の光学素子を調整して前記投影光学系の結像特性を調整する結像特性調整装置を更に備えることとすることができる。

本発明の第2の露光装置では、調整の対象となる結像特性は単一種類の結像特性であることとすることもできるが、前記結像特性には、複数種類の結像特

性が含まれていることとすることができる。後者の場合、前記計測装置は、前記投影光学系の複数種類の結像特性を計測可能であり、前記演算装置は、前記計測装置で計測された前記複数種類の結像特性の実測データと前記パラメータ群と前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を算出することとすることができる。

本発明の第2の露光装置では、調整の対象となる結像特性は、種々の結像特性が考えられ、これに対応して前記関係式も種々の関係式が考えられる。例えば、前記結像特性はツェルニケ多項式で表される波面収差であることとすることができる。

この場合において、前記関係式は、前記ツェルニケ多項式の各項の係数の内の任意の項の係数に重み付けを行うための重み付け関数を含む式であることとすることができる。

本発明は、第7の観点からすると、マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置の制御用コンピュータに所定の処理を実行させるプログラムであって、対象とするパターンの情報及び目的とする結像特性に関する情報の入力に応答してツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行う手順と；前記投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報の入力に応答して、前記対象とするパターンを焼き付けたときの前記与えられた収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する手順と；を前記制御用コンピュータに実行させる第1のプログラムである。

このプログラムが露光装置の制御用コンピュータにインストールされている場合、対象とするパターンの情報及び目的とする結像特性に関する情報を前記コンピュータに入力することにより、その入力に応答して前記コンピュータによりツェルニケ変化表を作成するための条件設定が行われる。次いで、この条件設定が行われたコンピュータに、投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報の入力することにより、その入力に応答して、前記コンピュータ

により対象とするパターンを焼き付けたときの与えられた収差の情報に応じた目的とする結像特性のツェルニケ変化表が作成される。すなわち、対象とするパターンの情報、目的とする結像特性に関する情報、投影光学系に関する情報、及び与えたい収差に関する情報などのツェルニケ変化表の作成に不可欠な最低限の情報を、コンピュータに入力するだけで、対象とするパターンを焼き付けたときの与えられた収差の情報に応じた目的とする結像特性のツェルニケ変化表を容易かつ簡単に作成することができる。この作成されたツェルニケ変化表は、同一種類の投影光学系を備えた他の露光装置で用いることが可能である。

本発明の第1のプログラムでは、前述の如くして、前記ツェルニケ変化表を作成した後に、前記投影光学系の波面収差の実測データの入力に応答して、該実測データと前記ツェルニケ変化表とに基づいて、前記投影光学系の前記目的とする結像特性を算出する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。かかる場合には、投影光学系の波面収差の実測データを、コンピュータに更に入力することにより、その入力に応答して、前記コンピュータにより、実測データと前記ツェルニケ変化表とに基づいて、投影光学系の目的とする結像特性が算出される。従って、最低1回の計測により得た波面収差の実測データをコンピュータに入力するだけで、目的とする結像特性をコンピュータに短時間で正確に算出させることができる。

本発明の第1のプログラムでは、前記算出した前記目的とする結像特性に関する情報を表示装置に表示する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

本発明の第1のプログラムでは、前記算出した前記目的とする結像特性が最適となる（例えば目標値との差が最小となる）ように前記投影光学系を調整する手順を、前記制御用コンピュータに、更に実行させることとすることができる。

本発明の第1のプログラムでは、前述のツェルニケ変化表の作成に加え、目

的とする結像特性を算出する場合、前記投影光学系に関する異なる情報の入力及び前記与えたい収差に関する情報の入力に応答して、前記投影光学系に関する異なる情報毎に前記ツェルニケ変化表をそれぞれ作成する手順と；前記投影光学系の波面収差の実測データの入力に応答して、該実測データと前記ツェルニケ変化表とに基づいて、前記投影光学系の前記目的とする結像特性を、前記投影光学系に関する異なる情報毎に算出する手順と；前記算出された目的とする結像特性が最適となる（例えば目標値との差が最小となる）前記投影光学系に関する情報を見つけることにより最適露光条件を決定する手順と；を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

この場合において、前記決定された最適露光条件を設定する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

本発明は、第8の観点からすると、目的とする結像特性に関する情報の入力及び前記投影光学系の波面収差の実測データの入力に応答して、該実測データと予め用意された前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて前記投影光学系の目的とする結像特性を算出する手順を、前記制御用コンピュータに実行させる第2のプログラムである。

このプログラムが露光装置の制御用コンピュータにインストールされている場合、目的とする結像特性に関する情報と投影光学系の波面収差の実測データとを、前記コンピュータに入力することにより、その入力に応答して前記コンピュータにより、該実測データと予め用意された前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて、投影光学系の目的とする結像特性が算出される。この場合、そのツェルニケ変化表は、例えば同一種類の投影光学系を備えた他の露光装置の制御用コンピュータにより、本発明の第1のプログラムを用いて作成された目的とする結像特性のツェルニケ変化表を、用いることができる。従って、目的とする結像特性に関する情報と最低1回の計測により得た波面収差の実測データとをコンピュータに入力するだけで、目的とする結像特性情報

をコンピュータに短時間で正確に算出させることができる。この場合、目的とする結像特性としては、例えば対象とするパターンの像の形成に与える影響の大きな結像特性を選択することが望ましい。

本発明の第2のプログラムでは、前記算出した前記目的とする結像特性に関する情報を表示装置に表示する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

本発明の第2のプログラムでは、前記算出した前記目的とする結像特性が最適となるように前記投影光学系を調整する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

本発明は、第9の観点からすると、マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置の制御用コンピュータに所定の処理を実行させるプログラムであって、前記投影光学系の結像特性の実測データの入力に応答して、該入力された結像特性の実測データと、前記投影光学系の調整と前記投影光学系の前記結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記投影光学系の目標調整量との関係式を用いて前記投影光学系の目標調整量を算出する手順を、前記制御用コンピュータに実行させる第3のプログラムである。

これによれば、露光装置の制御用コンピュータにこのプログラムを予めインストールする。そして、投影光学系の結像特性の実測データが入力されると、露光装置の制御用コンピュータが、プログラムに従って、その入力された結像特性の実測データと、投影光学系の調整と投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、投影光学系の目標調整量との関係式を用いて目標調整量を算出する。すなわち、オペレータ等は、実際に結像特性（収差）を計測し、その結像特性の実測値を入力するだけで、その結像特性を補正する投影光学系の目標調整量が算出される。従って、例えば、この算出された目標調整量に基づいて投影光学系を調整することにより投影光学系の結像特性を容易にかつ高精度に調整することが可能になる。

この場合において、前記算出された目標調整量に関する情報を表示装置に表示する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

本発明の第3のプログラムでは、前記算出された目標調整量に基づいて前記投影光学系を調整する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

本発明の第3のプログラムでは、前記パラメータ群は、前記投影光学系を構成する調整用の特定の光学素子の調整と前記結像特性の変化との関係を示すパラメータ群であり、前記目標調整量は、前記特定の光学素子を調整すべき量であることとすることができる。

本発明の第3のプログラムでは、前記結像特性はツェルニケ多項式で表される波面収差であることとすることができる。

この場合において、前記関係式は、前記ツェルニケ多項式の各項の係数の内の任意の項の係数に重み付けを行うための重み付け関数を含む式であることとすることができる。

本発明の第3のプログラムでは、対象とするパターンの情報及び目的とする結像特性に関する情報の入力に応答してツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行う手順と；前記投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報の入力に応答して前記収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する手順と；前記投影光学系の波面収差の実測データの入力に応答して、該実測データと前記ツェルニケ変化表とに基づいて前記目的とする結像特性を算出する手順と；を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

この場合において、前記算出した前記目的とする結像特性に関する情報を表示装置に表示する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

本発明の第3のプログラムでは、前記投影光学系の視野内の少なくとも1つの計測点で前記投影光学系を介して得られた光情報を前記投影光学系の前記波面収差の実測データに変換する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることとすることができる。

本発明の第1～第3のプログラムは、情報記録媒体に記録することが可能である。従って、本発明は、第10の観点からすると、本発明の第1～第3のプログラムのいずれかが記録されたコンピュータによる読み取りが可能な情報記録媒体であるとも言える。

また、リソグラフィ工程において、本発明の第1、第2の露光装置のいずれかを用いて露光を行うことにより、基板上にパターンを精度良く形成することができ、これにより、より高集積度のマイクロデバイスを歩留まり良く製造することができる。従って、本発明は、更に別の観点からすると、本発明の第1、第2の露光装置のいずれかを用いるデバイス製造方法（すなわち、第1、第2の露光装置のいずれかを用いてパターンを感光物体に転写する工程を含むデバイス製造方法）であるとも言える。

また、露光装置の製造に際して、投影光学系を露光装置本体に搭載した後に、本発明の第1、第2の結像特性調整方法のいずれかを用いて、投影光学系を調整することにより、投影光学系の結像特性を精度良く調整することができる。従って、本発明は、更に別の観点からすると、本発明の第1、第2の結像特性調整方法のいずれかを用いて前記投影光学系を調整する工程を含む露光装置の製造方法であるとも言える。

図面の簡単な説明

図1は、本発明の一実施形態に係る露光装置の概略構成を示す図である。

図2A～図2Fは、データベースの作成に際して行われる可動レンズ等の駆動方向の定義を説明するための図である。

図 3 は、計測用レチクルを示す概略斜視図である。

図 4 は、レチクルステージ上に装填した状態における計測用レチクルの光軸近傍の X Z 断面の概略図を投影光学系の模式図とともに示す図である。

図 5 は、レチクルステージ上に装填した状態における計測用レチクルの Y 側端部近傍の X Z 断面の概略図を投影光学系の模式図とともに示す図である。

図 6 A は、本実施形態の計測用レチクルに形成された計測用パターンを示す図であり、図 6 B は、本実施形態の計測用レチクルに形成された基準パターンを示す図である。

図 7 は、結像特性の計測及び表示（シミュレーション）時における主制御装置内の CPU の制御アルゴリズムを概略的に示すフローチャートである。

図 8 は、図 7 のサブルーチン 126 の処理を示すフローチャートである。

図 9 A は、ウェハ上のレジスト層に所定間隔で形成される計測用パターンの縮小像（潜像）を示す図であり、図 9 B は、図 9 A の計測用パターンの潜像と基準パターンの潜像の位置関係を示す図である。

図 10 は、ポータブルな波面収差計測器の一例を示す断面図である。

図 11 A は、光学系に収差が存在しない場合においてマイクロレンズアレイから射出される光束を示す図であり、図 11 B は、光学系に収差が存在する場合においてマイクロレンズアレイから射出される光束を示す図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、本発明の一実施形態を図 1 ～図 9 B に基づいて説明する。

図 1 には、一実施形態に係る露光装置 10 の概略構成が示されている。この露光装置 10 は、露光用光源（以下「光源」という）にパルスレーザ光源を用いたステップ・アンド・リピート方式の縮小投影露光装置、すなわちいわゆるステッパである。

この露光装置 10 は、光源 16 及び照明光学系 12 から成る照明系、この照

明系からのエネルギービームとしての露光用照明光E Lにより照明されるマスクとしてのレチクルRを保持するマスクステージとしてのレチクルステージR S T、レチクルRから射出された露光用照明光E Lを基板としてのウエハW上(像面上)に投射する投影光学系P L、ウエハWを保持するZチルトステージ5 8が搭載された基板ステージとしてのウエハステージW S T、及びこれらの制御系等を備えている。

前記光源1 6としては、ここでは、F₂ レーザ(出力波長1 5 7 n m)あるいはA r Fエキシマレーザ(出力波長1 9 3 n m)等の真空紫外域のパルス光を出力するパルス紫外光源が用いられている。なお、光源1 6として、K r Fエキシマレーザ(出力波長2 4 8 n m)などの遠紫外域あるいは紫外域のパルス光を出力する光源を用いても良い。

前記光源1 6は、実際には、照明光学系1 2の各構成要素及びレチクルステージR S T、投影光学系P L、及びウエハステージW S T等から成る露光装置本体が収納されたチャンバ1 1が設置されたクリーンルームとは別のクリーン度の低いサービスルームに設置されており、チャンバ1 1にビームマッチングユニットと呼ばれる光軸調整用光学系を少なくとも一部に含む不図示の送光光学系を介して接続されている。この光源1 6は、主制御装置5 0からの制御情報T Sに基づいて、内部のコントローラにより、レーザ光L Bの出力のオン・オフ、レーザ光L Bの1パルスあたりのエネルギー、発振周波数(繰り返し周波数)、中心波長及びスペクトル半値幅などが制御されるようになっている。

前記照明光学系1 2は、シリンダレンズ、ビームエキスパンダ(いずれも不図示)及びオプティカルインテグレータ(ホモジナイザ)2 2等を含むビーム整形・照度均一化光学系2 0、照明系開口絞り板2 4、第1リレーレンズ2 8 A、第2リレーレンズ2 8 B、レチクルブラインド3 0、光路折り曲げ用のミラーM及びコンデンサレンズ3 2等を備えている。なお、オプティカルインテグレータとしては、フライアイレンズ、ロッドインテグレータ(内面反射型イ

ンテグレータ)、あるいは回折光学素子などを用いることができる。本実施形態では、オプティカルインテグレータ 22 としてフライアイレンズが用いられているので、以下ではフライアイレンズ 22 と呼ぶものとする。

前記ビーム整形・照度均一化光学系 20 は、チャンバ 11 に設けられた光透過窓 17 を介して不図示の送光光学系に接続されている。このビーム整形・照度均一化光学系 20 は、光源 16 でパルス発光され光透過窓 17 を介して入射したレーザビーム L の断面形状を、例えばシリンダレンズやビームエキスパンダを用いて整形する。そして、ビーム整形・照度均一化光学系 20 内部の射出端側に位置するフライアイレンズ 22 は、レチクル R を均一な照度分布で照明するために、前記断面形状が整形されたレーザビームの入射により、照明光学系 12 の瞳面とほぼ一致するように配置されるその射出側焦点面に多数の点光源（光源像）から成る面光源（2 次光源）を形成する。この 2 次光源から射出されるレーザビームを以下においては、「照明光 E_L」と呼ぶものとする。

フライアイレンズ 22 の射出側焦点面の近傍に、円板状部材から成る照明系開口絞り板 24 が配置されている。この照明系開口絞り板 24 には、ほぼ等角度間隔で、例えば通常の円形開口より成る開口絞り（通常絞り）、小さな円形開口より成りコヒーレンスファクタである σ 値を小さくするための開口絞り（小 σ 絞り）、輪帯照明用の輪帯状の開口絞り（輪帯絞り）、及び変形光源法用に複数の開口を偏心させて配置して成る変形開口絞り（図 1 ではこのうちの 2 種類の開口絞りのみが図示されている）等が配置されている。この照明系開口絞り板 24 は、主制御装置 50 により制御されるモータ等の駆動装置 40 により回転されるようになっており、これによりいずれかの開口絞りが照明光 E_L の光路上に選択的に設定され、後述するケーラー照明における光源面形状が、輪帯、小円形、大円形、あるいは四つ目等に制限される。

なお、開口絞り板 24 の代わりに、あるいはそれと組み合わせて、例えば照明光学系内に交換して配置される複数の回折光学素子、照明光学系の光軸に沿

って可動なプリズム（円錐プリズム、多面体プリズムなど）、及びズーム光学系の少なくとも1つを含む光学ユニットを、光源16とオプティカルインテグレータ22との間に配置し、オプティカルインテグレータ22がフライアイレンズであるときはその入射面上での照明光の強度分布、オプティカルインテグレータ22が内面反射型インテグレータであるときはその入射面に対する照明光の入射角度範囲などを可変とすることで、照明光学系の瞳面上での照明光の光量分布（2次光源の大きさや形状）、すなわちレチクルRの照明条件の変更に伴う光量損失を抑えることが望ましい。また、本実施形態では内面反射型インテグレータによって形成される複数の光源像（虚像）をも2次光源と呼ぶものとする。

照明系開口絞り板24から出た照明光ELの光路上に、レチクルブラインド30を介在させて第1リレーレンズ28A及び第2リレーレンズ28Bから成るリレー光学系が配置されている。レチクルブラインド30は、レチクルRのパターン面に対する共役面に配置され、レチクルR上の矩形の照明領域IARを規定する矩形開口が形成されている。ここで、レチクルブラインド30としては、開口形状が可変の可動ブラインドが用いられており、主制御装置50によってマスキング情報とも呼ばれるブラインド設定情報に基づいてその開口が設定されるようになっている。

リレー光学系を構成する第2リレーレンズ28B後方の照明光ELの光路上には、当該第2リレーレンズ28Bを通過した照明光ELをレチクルRに向けて反射する折り曲げミラーMが配置され、このミラーM後方の照明光ELの光路上にコンデンサレンズ32が配置されている。

以上の構成において、フライアイレンズ22の入射面、レチクルブラインド30の配置面、及びレチクルRのパターン面は、光学的に互いに共役に設定され、フライアイレンズ22の射出側焦点面に形成される光源面（照明光学系の瞳面）、投影光学系PLのフーリエ変換面（射出瞳面）は光学的に互いに共役に

設定され、ケーラー照明系となっている。

このようにして構成された照明光学系 12 の作用を簡単に説明すると、光源 16 からパルス発光されたレーザビーム LB は、ビーム整形・照度均一化光学系に入射して断面形状が整形された後、フライアイレンズ 22 に入射する。これにより、フライアイレンズ 22 の射出側焦点面に前述した 2 次光源が形成される。

上記の 2 次光源から射出された照明光 EL は、照明系開口絞り板 24 上のいずれかの開口絞りを通過した後、第 1 リレーレンズ 28 A を経てレチクルブラインド 30 の矩形開口を通過した後、第 2 リレーレンズ 28 B を通過してミラー M によって光路が垂直下方に折り曲げられた後、コンデンサレンズ 32 を経て、レチクルステージ RST 上に保持されたレチクル R 上の矩形の照明領域 IAR を均一な照度分布で照明する。

前記レチクルステージ RST 上にはレチクル R が装填され、不図示の静電チャック（又はバキュームチャック）等を介して吸着保持されている。レチクルステージ RST は、不図示の駆動系により水平面（XY 平面）内で微小駆動（回転を含む）が可能な構成となっている。また、レチクルステージ RST は、Y 軸方向については、所定のストローク範囲（レチクル R の長さ程度）で移動可能な構成となっている。なお、レチクルステージ RST の位置は、不図示の位置検出器、例えばレチクルレーザ干渉計によって、所定の分解能（例えば 0.5 ~ 1 nm 程度の分解能）で計測され、この計測結果が主制御装置 50 に供給されるようになっている。

なお、レチクル R に用いる材質は、使用する光源によって使い分ける必要がある。すなわち、ArF エキシマレーザ、KrF エキシマレーザを光源とする場合は、合成石英を用いることができるが、F₂ レーザを用いる場合には、ホタル石等のフッ化物結晶や、フッ素ドープ石英等で形成する必要がある。

前記投影光学系 PL は、例えば両側テレセントリックな縮小系が用いられて

いる。この投影光学系PLの投影倍率は例えば $1/4$ 、 $1/5$ あるいは $1/6$ 等である。このため、前記の如くして、照明光ELによりレチクルR上の照明領域IARが照明されると、そのレチクルRに形成されたパターンが投影光学系PLによって前記投影倍率で縮小された像が表面にレジスト（感光剤）が塗布されたウエハW上の矩形の露光領域IA（通常は、ショット領域に一致）に投影され転写される。

投影光学系PLとしては、図1に示されるように、複数枚、例えば10～20枚程度の屈折光学素子（レンズ）13のみから成る屈折系が用いられている。この投影光学系PLを構成する複数枚のレンズ13のうち、物体面側（レチクルR側）の複数枚（ここでは、説明を簡略化するために4枚とする）のレンズ13₁、13₂、13₃、13₄は、結像特性補正コントローラ48によって外部から駆動可能な可動レンズとなっている。レンズ13₁、13₂、13₄は、不図示のレンズホルダにそれぞれ保持され、これらのレンズホルダが不図示の駆動素子、例えば piezo素子などにより重力方向に3点で支持されている。そして、これらの駆動素子に対する印加電圧を独立して調整することにより、レンズ13₁、13₂、13₄を投影光学系PLの光軸方向であるZ軸方向にシフト駆動、及びXY面に対する傾斜方向（すなわちX軸回りの回転方向及びY軸回りの回転方向）に駆動可能（チルト可能）な構成となっている。また、レンズ13₃は、不図示のレンズホルダに保持され、このレンズホルダの外周部に例えばほぼ90°間隔でpiezo素子などの駆動素子が配置されており、相互に対向する2つの駆動素子をそれぞれ一組として、各駆動素子に対する印加電圧を調整することにより、レンズ13₃をXY面内で2次元的にシフト駆動可能な構成となっている。本実施形態では、レンズ13₁、13₂、13₃、13₄のそれぞれが調整用の特定の光学素子を構成している。なお、特定の光学素子は、レンズ13₁～13₄に限られるものではなく、投影光学系PLの瞳面近傍、又は像面側に配置されるレンズ、あるいは投影光学系PLの収差、特にその非

回転対称成分を補正する収差補正板（光学プレート）などを含んでも良い。更に、特定の光学素子の自由度（移動可能な方向）は2つ又は3つに限られるものではなく1つ又は4つ以上でも良い。

また、投影光学系P Lの瞳面の近傍には、開口数（N. A.）を所定範囲内に連続的に変更可能な瞳開口絞り15が設けられている。この瞳開口絞り15としては、例えばいわゆる虹彩絞りが用いられている。この瞳開口絞り15は、主制御装置50によって制御される。

なお、照明光E LとしてA r Fエキシマレーザ光、K r Fエキシマレーザ光を用いる場合には、投影光学系P Lを構成する各レンズエレメントとしては合成石英を用いることができるが、F₂レーザ光を用いる場合には、この投影光学系P Lに使用されるレンズの材質は、全てホタル石等のフッ化物結晶や前述したフッ素ドープ石英が用いられる。

前記ウエハステージW S Tは、ウエハステージ駆動部56によりX Y 2次元面内で自在に駆動されるようになっている。このウエハステージW S T上に搭載されたZチルトステージ58上には不図示のウエハホルダを介してウエハWが静電吸着（あるいは真空吸着）等により保持されている。Zチルトステージ58は、ウエハWのZ方向の位置（フォーカス位置）を調整するとともに、X Y平面に対するウエハWの傾斜角を調整する機能を有する。また、ウエハステージW S TのX、Y位置及び回転（ヨーイング、ピッチング、ローリングを含む）は、Zチルトステージ58上に固定された移動鏡52Wを介して外部のウエハレーザ干渉計54Wにより計測され、このウエハレーザ干渉計54Wの計測値が主制御装置50に供給されるようになっている。

また、Zチルトステージ58上には、いわゆるベースライン計測用の基準マーク等の基準マークが計測された基準マーク板F Mが、その表面がほぼウエハWの表面と同一高さとなるように固定されている。

本実施形態の露光装置10では、図示は省略されているが、レチクルRの上

方に、投影光学系PLを介してレチクルR上のレチクルマーク2と基準マーク板のマークとを同時に観察するための露光波長を用いたTTR (Through The Reticle) アライメント光学系から成る一対のレチクルアライメント顕微鏡が設けられている。これらのレチクルアライメント顕微鏡としては、例えば特開平7-176468号公報及びこれに対応する米国特許第5,646,413号などに開示されるものと同様の構成のものが用いられている。本国際出願で指定した指定国又は選択した選択国の国内法令が許す限りにおいて、上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

また、図示は省略されているが、本実施形態では、ウエハWのZ方向位置は、例えば特開平6-283403号公報及びこれに対応する米国特許第5,448,332号等の開示される多点焦点位置検出系から成るフォーカスセンサによって計測されるようになっており、このフォーカスセンサの出力が主制御装置50に供給され、主制御装置ではZチルトステージ58を制御していわゆるフォーカスレベリング制御を行うようになっている。本国際出願で指定した指定国又は選択した選択国の国内法令が許す限りにおいて、上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

さらに、前記投影光学系PLの側面には、不図示のオフアクシス (off-axis) 方式のアライメント系が設置されている。このアライメント系としては、例えば、ウエハ上のレジストを感光させないブロードバンドな検出光束を対象マークに照射し、その対象マークからの反射光により受光面に結像された対象マークの像と不図示の指標の像とを撮像素子 (CCD) 等を用いて撮像し、それらの撮像信号を出力する画像処理方式のFIA (Filed Image Alignment) 系の顕微鏡が用いられている。このアライメント系の出力に基づき、基準マーク板FM上の基準マーク及びウエハ上のアライメントマークのX、Y 2次元方向の位置計測を行うことが可能である。

制御系は、図1中、前記主制御装置50によって主に構成される。主制御装

置50は、CPU（中央演算処理装置）、ROM（リード・オンリ・メモリ）、RAM（ランダム・アクセス・メモリ）等からなるいわゆるワークステーション（又はマイクロコンピュータ）等から構成され、露光動作が的確に行われるように、例えば、ウエハステージWSTのショット間ステッピング、露光タイミング等を統括して制御する。

また、本実施形態では、主制御装置50には、例えばハードディスクから成る記憶装置42、キーボード、マウス等のポインティングデバイス等を含んで構成される入力装置45、CRTディスプレイ（又は液晶ディスプレイ）等の表示装置44、及びCD-ROM、DVD-ROM、MOあるいはFD等の情報記録媒体のドライブ装置46が、外付けで接続されている。ドライブ装置46にセットされた情報記録媒体（以下の説明では便宜上CD-ROMとする）に、後述するようにして計測レチクル R_T を用いて計測された位置ずれ量をツェルニケ多項式の各項の係数に変換する変換プログラム（第1プログラム）、該第1プログラムで変換されたツェルニケ多項式の各項の係数に基づいて結像特性の調整量を演算する第2プログラム、第1プログラムで変換されたツェルニケ多項式の各項の係数を種々の結像特性（結像特性の指標値を含む）に変換する第3プログラム、及び第2プログラムに付属するデータベースが格納されている。

次に、上記データベースについて説明する。このデータベースは、結像特性、ここでは波面収差の計測結果の入力に応じて、結像特性を調整するための前述した可動レンズ 13_1 、 13_2 、 13_3 、 13_4 の目標駆動量（目標調整量）を算出するためのパラメータ群の数値データから成るデータベースである。このデータベースは、可動レンズ 13_1 、 13_2 、 13_3 、 13_4 を各自由度方向（駆動可能な方向）について単位調整量駆動した場合に、投影光学系PLの視野内の複数の計測点それぞれに対応する結像特性、具体的には波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の第2項～第37項の係数がどのように変化するかのデー

タを、投影光学系PLと実質的に等価なモデルを用いて、シミュレーションを行い、このシミュレーション結果として得られた結像特性の変動量を所定の規則に従って並べたデータ群から成る。

ここで、このデータベースの作成手順について、簡単に説明する。特定の光学ソフトがインストールされているシミュレーション用コンピュータに、まず、投影光学系PLの設計値（開口数 $N.A.$ 、コヒーレンスファクタ σ 値、波長、各レンズのデータ等）を入力する。次に、シミュレーション用コンピュータに、投影光学系PLの視野内の任意の第1計測点（ここでは、後述する計測用レチクル R_T のいずれかのピンホールの位置に対応）のデータを入力する。

次いで、可動レンズの各自由度方向（可動方向）についての単位量のデータを入力するのであるが、それに先立ちその前提となる条件について説明する。

すなわち、可動レンズ 13_1 、 13_2 、 13_4 については、図2A、図2Bにそれぞれ示されるように、各可動レンズ 13 をX軸回り、Y軸回りにそれぞれ矢印で示される方向に回転させる方向をY方向チルト、X方向チルトの+（正）方向とし、単位チルト量を0.1度とする。また、図2Cに示されるように各可動レンズ 13 を+Z方向にシフトさせる方向をZ方向シフトの+（正）方向とし、単位シフト量を $100\mu m$ とする。

また、可動レンズ 13_3 については、図2D、図2Eにそれぞれ示されるように、可動レンズ 13_3 を+X方向にシフトする方向をX方向シフトの+（正）方向とし、+Y方向にシフトする方向をY方向シフトの+（正）方向とし、単位シフト量を $100\mu m$ とする。

そして、例えば可動レンズ 13_1 をY方向チルトの+方向に関して単位量だけ駆動するという指令を入力すると、シミュレーション用コンピュータにより、投影光学系PLの視野内の予め定めた第1計測点についての第1波面の理想波面からの変化量のデータ、例えばツェルニケ多項式の各項（例えば第2項～第37項）の係数の変化量が算出され、その変化量のデータがディスプレイの画

面上に表示されるとともに、その変化量がパラメータ $PARA1P1$ としてメモリに記憶される。

次いで、可動レンズ 13_1 を X 方向チルトの + 方向に関して単位量だけ駆動するという指令を入力すると、シミュレーション用コンピュータにより、第 1 計測点についての第 2 波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の上記各項の係数の変化量が算出され、その変化量のデータがディスプレイの画面上に表示されるとともに、その変化量がパラメータ $PARA2P1$ としてメモリに記憶される。

次いで、可動レンズ 13_1 を Z 方向シフトの + 方向に関して単位量だけ駆動するという指令を入力すると、シミュレーション用コンピュータにより、第 1 計測点についての第 3 波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の上記各項の係数の変化量が算出され、その変化量のデータがディスプレイの画面上に表示されるとともに、その変化量がパラメータ $PARA3P1$ としてメモリに記憶される。

以後、上記と同様の手順で、第 2 計測点～第 n 計測点までの各計測点の入力が行われ、可動レンズ 13_1 の Y 方向チルト、X 方向チルト、Z 方向シフトの指令入力が行われる度に、シミュレーション用コンピュータによって各計測点における第 1 波面、第 2 波面、第 3 波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の上記各項の係数の変化量が算出され、各変化量のデータがディスプレイの画面上に表示されるとともに、パラメータ $PARA1P2$, $PARA2P2$, $PARA3P2$, ……、 $PARA1Pn$, $PARA2Pn$, $PARA3Pn$ としてメモリに記憶される。

他の可動レンズ 13_2 , 13_3 , 13_4 についても、上記と同様の手順で、各計測点の入力と、各自由度方向に関してそれぞれ単位量だけ + 方向に駆動する旨の指令入力が行われ、これに応答してシミュレーション用コンピュータにより、可動レンズ 13_2 , 13_3 , 13_4 を各自由度方向に単位量だけ駆動した際

の第1～第n計測ポイントのそれぞれについての波面のデータ、例えばツェルニケ多項式の各項の変化量が算出され、パラメータ (PARA4P1, PARA5P1, PARA6P1, …… , PARAmP1)、パラメータ (PARA4P2, PARA5P2, PARA6P2, …… , PARAmP2)、……、パラメータ (PARA4Pn, PARA5Pn, PARA6Pn, …… , PARAmPn) がメモリ内に記憶される。そして、このようにしてメモリ内に記憶されたツェルニケ多項式の各項の係数の変化量から成る列マトリックス (縦ベクトル) PARA1P1～PARAmPnを要素とする次式 (1) で示されるマトリックス (行列) Oのデータが、上記データベースとして、CD-ROM内に格納されている。なお、本実施形態では、3自由度方向に可動なレンズが3つ、2自由度方向に可動なレンズが1つであるから、 $m = 3 \times 3 + 2 \times 1 = 11$ となっている。

$$O = \begin{bmatrix} \text{PARA1P1} & \text{PARA2P1} & \dots & \dots & \text{PARAmP1} \\ \text{PARA1P2} & \text{PARA2P2} & \dots & \dots & \text{PARAmP2} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \text{PARA1Pn} & \text{PARA2Pn} & \dots & \dots & \text{PARAmPn} \end{bmatrix} \dots (1)$$

次に、露光装置10のオペレータが投影光学系PLの収差の状況を容易に把握するための結像特性の計測及び表示方法 (シミュレーション方法) について説明する。本実施形態のシミュレーションには、投影光学系PLの波面収差の実測データが必要となり、この波面収差の計測に際して計測用レチクルRT (以下、適宜「レチクルRT」ともいう) を用いるので、まず、計測用レチクルRTについて説明する。

図3には、この計測用レチクルRTの概略斜視図が示されている。また、図4には、レチクルステージRST上に装填した状態におけるレチクルRTの光軸AX近傍のXZ断面の概略図が、投影光学系PLの模式図とともに示されて

いる。また、図5には、レチクルステージRST上に装填した状態におけるレチクル R_T の-Y側端部近傍のXZ断面の概略図が、投影光学系PLの模式図とともに示されている。

図3から明らかなように、この計測用レチクル R_T の全体形状は、通常のペリクル付きレチクルとほぼ同様の形状を有している。この計測用レチクル R_T は、ガラス基板60、該ガラス基板60の図3における上面のX軸方向中央部に、固定された長方形板状の形状を有するレンズ取付け部材62、ガラス基板60の図3における下面に取り付けられた通常のペリクルフレームと同様の外観を有する枠状部材から成るスペーサ部材64、及びこのスペーサ部材64の下面に取り付けられた開口板66等を備えている。

前記レンズ取付け部材62には、Y軸方向の両端部の一部の帯状の領域を除く、ほぼ全域にマトリックス状配置で n 個の円形開口 $63_{i,j}$ ($i=1\sim p$ 、 $j=1\sim q$ 、 $p\times q=n$) が形成されている。各円形開口 $63_{i,j}$ の内部には、Z軸方向の光軸を有する凸レンズから成る集光レンズ $65_{i,j}$ がそれぞれ設けられている(図4参照)。

また、ガラス基板60とスペーサ部材64と開口板66とで囲まれる空間の内部には、図4に示されるように、補強部材69が所定の間隔で設けられている。

更に、前記各集光レンズ $65_{i,j}$ に対向して、図4に示されるように、ガラス基板60の下面には、計測用パターン $67_{i,j}$ がそれぞれ形成されている。また、開口板66には、図4に示されるように、各計測用パターン $67_{i,j}$ にそれぞれ対向してピンホール状の開口 $70_{i,j}$ が形成されている。このピンホール状の開口 $70_{i,j}$ は、例えば直径 $100\sim 150\mu m$ 程度とされる。

図3に戻り、レンズ保持部材62には、Y軸方向の両端部の一部の帯状の領域の中央部に、開口 72_1 、 72_2 がそれぞれ形成されている。図5に示されるように、ガラス板60の下面(パターン面)には、一方の開口 72_1 に対向し

て基準パターン 74_1 が形成されている。また、図示は省略されているが、他方の開口 72_2 に対向して、ガラス板60の下面（パターン面）に、基準パターン 74_1 と同様の基準パターン（便宜上、「基準パターン 74_2 」と記述する）が形成されている。

また、図3に示されるように、ガラス基板60のレチクル中心を通るX軸上には、レンズ保持部材62の両外側に、レチクル中心に関して対称な配置で一对のレチクルアライメントマークRM1、RM2が形成されている。

ここで、本実施形態では、計測用パターン $67_{i,j}$ として、図6Aに示されるような網目状（ストリートライン状）のパターンが用いられている。また、これに対応して、基準パターン 74_1 、 74_2 として、図6Bに示されるような、計測用パターン $67_{i,j}$ と同一ピッチで正方形パターンが配置された2次元の格子パターンが用いられている。なお、基準パターン 74_1 、 74_2 として図6Aのパターンを用い、計測用パターンとして図6Bに示されるパターンを用いることは可能である。また、計測用パターン $67_{i,j}$ は、これに限られず、その他の形状のパターンを用いても良く、その場合には、基準パターンとして、その計測用パターンとの間に所定の位置関係があるパターンを用いれば良い。すなわち、基準パターンは、計測用パターンの位置ずれの基準となるパターンであれば良く、その形状等は問わないが、投影光学系PLの結像特性（光学特性）を計測するためには、投影光学系PLのイメージフィールド又は露光エリアの全面に渡ってパターンが分布しているパターンが望ましい。

次に、露光装置10のオペレータが投影光学系PLの収差の状況を容易に把握するための結像特性の計測及び表示方法（シミュレーション方法）について、主制御装置50内のCPUの制御アルゴリズムを概略的に示す図7のフローチャートに沿って、かつ適宜他の図面を参照しつつ説明する。

前提として、第1～第3プログラム及び前述のデータベースが格納されたCD-ROMがドライブ装置46にセットされ、そのCD-ROMから第1、第

3プログラムが、記憶装置42にインストールされているものとする。

このフローチャートがスタートするのは、オペレータにより、入力装置45を介してシミュレーション開始の指令が入力された時点である。

まず、ステップ101において、第3プログラムをメインメモリにロードする。以後、ステップ102～ステップ122まで、第3プログラムに従って処理が行われることとなる。

まず、ステップ102では、条件設定の画面を表示装置44に表示した後、ステップ104に進んで条件の入力されるのを待つ。そして、オペレータにより、条件設定画面に対して、シミュレーションの対象であるパターンの情報（例えばラインアンドスペースパターンの場合、ピッチ、線幅、デューティ比等）、及び目的とする結像特性（該結像特性の指標値を含む；以下、適宜「目的収差」とも呼ぶ）の情報、例えば線幅異常値等の情報が入力装置45を介して入力され、入力完了の指示がなされると、ステップ106に進んで上記ステップ104で入力された目的収差のツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行った後、次のステップ108に進む。なお、ステップ104で入力される目的収差の情報は、一種類とは限らない。すなわち、投影光学系PLの複数種類の結像特性を同時に目的収差として指定することは可能である。

ステップ108では、投影光学系に関する情報の入力画面を表示装置44に表示した後、ステップ110に進んでその情報の入力を待つ。そして、オペレータにより、この入力画面に対して投影光学系PLに関する情報、具体的には、開口数（N.A.）、照明条件（例えば照明系開口絞りの設定、あるいはコヒーレンスファクタ σ 値等）、波長などの情報が入力装置45を介して入力されると、ステップ112に進んで、入力内容をRAM内に記憶するとともに、収差情報の入力画面を表示装置44に表示した後、ステップ114に進んで収差情報が入力されるのを待つ。

オペレータは、収差情報の入力画面に対し、与えたい収差の情報、具体的に

は、ツェルニケ多項式の各項の係数の値を、例えば、第2項の係数 Z_2 ～第37項の係数 Z_{37} として、同一の値、例えば0.05 λ を、個別に入力することとなる。

上記の収差の入力がなされると、ステップ116に進み、入力された収差の情報、例えば0.05 λ に応じた1つの目的の収差又はその指標値（例えばコマ収差の指標値である線幅異常値など）を縦軸とし、横軸をツェルニケ多項式の各項の係数とするグラフ（例えば線幅異常値などのツェルニケ変化表（計算表））を作成した後、ステップ118に進んで作成完了の確認画面を表示装置44の画面上に表示する。

次のステップ120では、確認の入力がなされるのを待つ。オペレータにより入力装置45を構成するマウス等を介して確認の入力がなされると、ステップ122に進んで、上記ステップ116で作成した変化表をRAM内に記憶するとともに、上記ステップ104で入力された全ての目的の収差についてツェルニケ変化表を作成したか否かを判断する。そして、この判断が否定された場合には、ステップ116に戻り、次の目的収差について変化表を作成する。なお、本実施形態では1つの目的収差につき、投影光学系PLの開口数や照明条件などの条件を変えことなく1つの変化表を作成するものとしているが、例えば投影光学系PLの開口数と照明条件との少なくとも一方を変えて、1つの目的収差につき複数の変化表を作成しても良い。また、シミュレーション対象のパターンを複数とし、パターン毎に目的収差について変化表を作成しても良い。

そして、全ての目的収差についての変化表の作成が終了し、ステップ120で確認の入力がなされると、ステップ122の判断が肯定されて、次のステップ124に進む。

このステップ124では、後述する位置ずれ（ $\Delta\xi$, $\Delta\eta$ ）のデータが入力されたことを示すフラグFが「1」であるか（立っているか）否かを判断する。

ここでは、位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) のデータは入力されていないので、ここでの判断は否定され、次の波面収差の計測サブルーチン 126 に移行して、計測用レチクル R_T を用いて、投影光学系 PL の視野内の複数 (ここでは、 n 個) の計測点において、以下のようにして、波面収差を計測する。

すなわち、このサブルーチン 126 では、まず、図 8 のステップ 202 において、不図示のレチクルローダを介して計測用レチクル R_T をレチクルステージ RST 上にロードする。

次のステップ 204 では、レーザ干渉計 54W の出力をモニタしつつ、ウエハステージ駆動部 56 を介してウエハステージ WST を移動し、基準マーク板 FM 上の一対のレチクルアライメント用基準マークを予め定められた基準位置に位置決めする。ここで、この基準位置とは、例えば一対の基準マークの中心が、レーザ干渉計 54W で規定されるステージ座標系上の原点に一致する位置に定められている。

次のステップ 206 では、計測用レチクル R_T 上の一対のレチクルアライメントマーク $RM1$, $RM2$ とこれらに対応するレチクルアライメント用基準マークとを、前述のレチクルアライメント顕微鏡により同時に観察し、レチクルアライメントマーク $RM1$, $RM2$ の基準板 FM 上への投影像と、対応する基準マークとの位置ずれが、共に最小となるように、不図示の駆動系を介してレチクルステージ RST を XY 2 次元面内で微少駆動する。これにより、レチクルアライメントが終了し、レチクル中心が投影光学系 PL の光軸にほぼ一致する。

次のステップ 208 では、不図示のウエハローダを用いて表面にレジスト (感光剤) が塗布されたウエハ W を Z チルトステージ 58 上にロードする。

次のステップ 210 では、計測用レチクル R_T の集光レンズ 65_{i,j} の全てが含まれ、かつ開口 72₁, 72₂ が含まれず、レンズ保持部材 62 の X 軸方向の最大幅以内の X 軸方向の長さを有する矩形の照明領域を形成するため、不図示

の駆動系を介してレチクルブラインド30の開口を設定する。また、これと同時に、駆動装置40を介して照明系開口絞り板24を回転して、所定の開口絞り、例えば小 σ 絞りを照明光ELの光路上に設定する。これにより露光のための準備作業が終了する。

次のステップ212では、制御情報TSを光源16に与えて、レーザビームLBを発光させて、照明光ELをレチクルR_Tに照射して露光を行う。これにより、図4に示されるように、各計測用パターン67_{i,j}が、対応するピンホール状の開口70_{i,j}及び投影光学系PLを介して同時に転写される。この結果、ウエハW上のレジスト層には、図9Aに示されるような各計測用パターン67_{i,j}の縮小像（潜像）67'_{i,j}が、所定間隔でXY2次元方向に沿って所定間隔で形成される。

次のステップ214では、基準パターンをステップ・アンド・リピート方式でウエハW上の計測用パターンの像が既に形成された領域に順次重ね合せて転写する。具体的には、次のa.～g.の通りである。

a. まず、不図示のレチクルレーザ干渉計の計測値と、レチクルセンタと一方の基準パターン74₁との設計上の位置関係とに基づいて、基準パターン74₁の中心位置が光軸AX上に一致するように、不図示の駆動系を介してレチクルステージRSTをY軸方向に所定距離移動する。

b. 次に、その移動後の開口72₁を含むレンズ保持部材62上の所定面積の矩形領域（この領域は、いずれの集光レンズにも掛からない）にのみ照明光ELの照明領域を規定すべく、不図示の駆動系を介してレチクルブラインド30の開口を設定する。

c. 次に、最初の計測用パターン67_{1,1}の潜像67'_{1,1}が形成されたウエハW上の領域のほぼ中心が、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レーザ干渉計54Wの計測値をモニタしつつ、ウエハステージWSTを移動する。

d. そして、主制御装置 50 では、制御情報 TS を光源 16 に与えて、レーザビーム LB を発光させて、照明光 EL をレチクル R_T に照射して露光を行う。これにより、ウエハ W 上のレジスト層の計測用パターン $67_{1,1}$ の潜像が既に形成されている領域（領域 $S_{1,1}$ と呼ぶ）に基準パターン 74_1 が重ねて転写される。この結果、ウエハ W 上の領域 $S_{1,1}$ には、図 9 B に示されるように、計測用パターン $67_{1,1}$ の潜像 $67'_{1,1}$ と基準パターン 74_1 の潜像 $74'_1$ が同図のような位置関係で形成される。

e. 次に、レチクル R_T 上の計測用パターン $67_{i,j}$ の配列ピッチと投影光学系 PL の投影倍率とに基づいて、ウエハ W 上の計測用パターン $67_{i,j}$ の設計上の配列ピッチ p を算出し、そのピッチ p だけ、ウエハステージ WST を X 軸方向に移動して、第 2 番目の計測用パターン $67_{1,2}$ の潜像が形成されたウエハ W 上の領域（領域 $S_{1,2}$ と呼ぶ）のほぼ中心が、投影光学系 PL の光軸上にほぼ一致するように、ウエハステージ WST を移動する。

f. そして、制御情報 TS を光源 16 に与えて、レーザビーム LB を発光させて、照明光 EL をレチクル R_T に照射して露光を行う。これにより、ウエハ W 上の領域 $S_{1,2}$ には基準パターン 74_1 が重ねて転写される。

g. 以後、上記と同様の領域間ステッピング動作と、露光動作とを繰り返す。これにより、ウエハ W 上の領域 $S_{i,j}$ に、図 9 B と同様の計測用パターンと基準パターンとの潜像が形成される。

このようにして、露光が終了すると、次のステップ 216 に進み、不図示のウエハローダを介してウエハ W を Z チルトステージ 58 上からアンロードした後、チャンバ 11 にインラインにて接続されている不図示のコータ・デベロッパ（以下、「C/D」と略述する）に送った後、ステップ 218 に進んで、後述する位置ずれ（ $\Delta \xi$, $\Delta \eta$ ）のデータが入力されるのを待つ。

そして、C/D 内で、そのウエハ W の現像が行われ、その現像後にウエハ W 上には、マトリックス状に配列された各領域 $S_{i,j}$ に図 9 B と同様の配置で計測

用パターンと基準パターンとのレジスト像が形成される。

その後、現像が終了したウエハWは、C/Dから取り出され、外部の重ね合せ測定器（レジストレーション測定器）を用いて、各領域 $S_{i,j}$ についての重ね合せ誤差の測定が行われ、この結果に基づいて、各計測用パターン $67_{i,j}$ のレジスト像の対応する基準パターン 74_1 に対する位置誤差（位置ずれ）が算出される。

なお、この位置ずれの算出方法は、種々考えられるが、いずれにしても、計測された生データに基づいて統計演算を行うことが、精度を向上する観点からは望ましい。

このようにして、各領域 $S_{i,j}$ について、基準パターンに対する計測用パターンのX、Y 2次元方向の位置ずれ（ $\Delta\xi$, $\Delta\eta$ ）が求められる。そして、この各領域 $S_{i,j}$ についての位置ずれ（ $\Delta\xi$, $\Delta\eta$ ）のデータが、オペレータにより、入力装置45を介して入力されると、ステップ218の判断が肯定され、図7のメインルーチンのステップ128にリターンする。

なお、外部の重ね合せ測定器から、演算した各領域 $S_{i,j}$ についての位置ずれ（ $\Delta\xi$, $\Delta\eta$ ）のデータを、オンラインにて入力することも可能である。この場合も、この入力に応答して、メインルーチンのステップ128にリターンする。

メインルーチンのステップ128では、第1プログラムをメインメモリにロードし、次のステップ130に進み、入力された位置ずれ（ $\Delta\xi$, $\Delta\eta$ ）に基づいて、以下に説明する原理に従って、各領域 $S_{i,j}$ に対応する、すなわち投影光学系PLの視野内の第1計測点～第n計測点に対応する波面（波面収差）、ここでは、ツェルニケ多項式の各項の係数、例えば第2項の係数 Z_2 ～第37項の係数 Z_{37} を第1プログラムに従って演算する。なお、メインメモリに空き領域が十分ある場合には、先にロードした第3プログラムはメインメモリにロードしたままにすることができるが、ここでは、空き領域があまりなく、第3プ

プログラムを一旦記憶装置 42 の元の領域にアンロードした後、第 1 プログラムをロードするものとする。

本実施形態では、上記の位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) に基づいて、第 1 プログラムに従った演算により投影光学系 PL の波面を求めるのであるが、この演算過程を説明する前提として、位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) と波面との物理的な関係を、図 4 及び図 5 に基づいて簡単に説明する。

図 4 に、計測用パターン 67_{k,l} について、代表的に示されるように、計測用パターン 67_{i,j} で発生した回折光のうち、ピンホール状の開口 70_{i,j} を通過した光は、計測用パターン 67_{k,l} のどの位置に由来する光であるかによって、投影光学系 PL の瞳面を通る位置が異なる。すなわち、当該瞳面の各位置における波面は、その位置に対応する計測用パターン 67_{k,l} における位置を介した光の波面と対応している。そして、仮に投影光学系 PL に収差が全くないものとする、それらの波面は、投影光学系 PL の瞳面では、符号 F_1 で示されるような理想波面（ここでは平面）となるはずである。しかるに、収差の全く無い投影光学系は実際には存在しないため、瞳面においては、例えば、点線で示されるような曲面状の波面 F_2 となる。従って、計測用パターン 67_{i,j} の像は、ウエハ W 上で波面 F_2 の理想波面に対する傾きに応じてずれた位置に結像される。

この一方、基準パターン 74₁（又は 74₂）から発生する回折光は、図 5 に示されるように、ピンホール状の開口の制限を受けることなく、しかも投影光学系 PL に直接入射し、該投影光学系 PL を介してウエハ W 上に結像される。更に、この基準パターン 74₁ を用いた露光は、投影光学系 PL の光軸上に基準パターン 74₁ の中心を位置決めした状態で行われることから、基準パターン 74₁ から発生する結像光束は殆ど投影光学系 PL の収差の影響を受けることなく、光軸を含む微小領域に位置ずれなく結像する。

従って、位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) は、波面の理想波面に対する傾斜をそのま

ま反映した値になり、逆に位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) に基づいて波面を復元することができる。なお、上記の位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) と波面との物理的な関係から明らかなように、本実施形態における波面の算出原理は、周知の Shack-Hartmann の波面算出原理そのものである。

次に、上記の位置ずれに基づいて、波面を算出する方法について、簡単に説明する。

上述の如く、位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) は波面の傾きに対応しており、これを微分することにより波面の形状（厳密には基準面（理想波面）からのずれ）が求められる。波面（波面の基準面からのずれ）の式を $W(x, y)$ とし、比例係数を k とすると、次式 (2)、(3) のような関係式が成立する。

$$\Delta \xi = k \frac{\partial W}{\partial x} \quad \dots (2)$$

$$\Delta \eta = k \frac{\partial W}{\partial y} \quad \dots (3)$$

位置ずれのみでしか与えられていない波面の傾きをそのまま微分するのは容易ではないため、面形状を級数に展開して、これにフィットするものとする。この場合、級数は直交系を選ぶものとする。ツェルニケ多項式は軸対称な面の展開に適した級数で、円周方向は三角級数に展開する。すなわち、波面 W を極座標系 (ρ, θ) で表すと、ツェルニケ多項式を $R_n^m(\rho)$ として、次式 (4) のように展開できる。

$$W(\rho, \theta) = \sum_n A_n^0 R_n^0(\rho) + \sum_n \sum_m (A_n^m \cos m\theta + B_n^m \sin m\theta) R_n^m(\rho) \quad \dots (4)$$

なお、 $R_n^m(\rho)$ の具体的な形は、周知であるので、詳細な説明は省略する。直交系であるから各項の係数、 A_n^m , B_n^m は独立に決定することができる。

有限項で切ることある種のフィルタリングを行うことに対応する。

実際には、その微分が上記の位置ずれとして検出されるので、フィッティングは微係数について行う必要がある。極座標系 ($x = \rho \cos \theta$, $y = \rho \sin \theta$) では、次式 (5)、(6) のように表される。

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial \rho} \cos \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial W}{\partial \theta} \sin \theta \quad \dots(5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial W}{\partial \rho} \sin \theta + \frac{1}{\rho} \frac{\partial W}{\partial \theta} \cos \theta \quad \dots(6)$$

ツェルニケ多項式の微分形は直交系ではないので、フィッティングは最小自乗法で行う必要がある。1つの計測用パターンからの情報(ずれの量)はXとY方向につき与えられるので、計測用パターンの数をn (nは、例えば81~400程度とする)とすると、上式(2)~(6)で与えられる観測方程式の数は2n (=162~800程度)となる。

ツェルニケ多項式のそれぞれの項は光学収差に対応する。しかも低次の項はザイデル収差にほぼ対応する。ツェルニケ多項式を用いることにより、投影光学系PLの波面収差を求めることができる。

なお、計測用レチクル R_T と同様の構成の特殊な構造のマスクを用い、そのマスク上の複数の計測用パターンのそれぞれを、個別に設けられたピンホール及び投影光学系を順次介して基板上に焼き付けるとともに、マスク上の基準パターンを集光レンズ及びピンホールを介することなく、投影光学系を介して基板上に焼き付けて、それぞれの焼き付けの結果得られる複数の計測用パターンのレジスト像それぞれの基準パターンのレジスト像に対する位置ずれを計測して所定の演算により、波面収差を算出する技術に関する発明が、米国特許第5,978,085号に開示されている。

上述のような原理に従って、第1プログラムの演算手順が決められており、

この第1プログラムに従った演算処理により、投影光学系PLの視野内の第1計測点～第n計測点に対応する波面（波面収差）、ここでは、ツェルニケ多項式の各項の係数、例えば第2項の係数 Z_2 ～第37項の係数 Z_{37} が求められる。

このようにして、波面のデータ（ツェルニケ多項式の各項の係数、例えば第2項の係数 Z_2 ～第37項の係数 Z_{37} ）を求めると、次のステップ132に進み、前述したフラグFを1にする（立てる）とともに、その波面のデータをRAM内の一時記憶領域に格納する。

次のステップ134では、再び第3プログラムをメインメモリにロードする。勿論、この場合、第1プログラムを記憶装置42の元の領域に戻した後、第3プログラムがロードされる。

次のステップ136では、第3プログラムに従って、先に作成したツェルニケ変化表（計算表）を用いて、計測点毎に、次式（7）のような演算を行って、先にステップ104で入力された目的収差の1つを算出する。

$$A = K \cdot \{Z_2 \cdot (\text{変化表の値}) + Z_3 \cdot (\text{変化表の値}) + \dots + Z_{37} \cdot (\text{変化表の値})\} \quad \dots (7)$$

ここで、Aは、投影光学系PLの目的収差、例えば非点収差、像面湾曲等、あるいは、目的収差の指標値、例えばコマ収差の指標値である線幅異常値などである。

また、Kは、レジスト感度等に応じて定まる比例定数である。

次のステップ138では、上述のようにして算出した計測点毎の目的収差、あるいはその指標値を表示装置44に表示する。この表示により、オペレータは、投影光学系PLについての知りたい収差を容易に認識することができる。

次のステップ140では、全ての目的収差（条件設定された収差（結像特性））を算出したか否かを判断し、この判断が否定された場合には、ステップ136に戻り、次の目的収差を算出、表示する。

このようにして、全ての目的収差の算出及び表示が終了すると、ステップ1

4 2に進んで表示装置 4 4に続行確認の画面を表示した後、ステップ 1 4 4に進んで表示開始から一定時間が経過するのを待つ。

そして、一定時間経過後、ステップ 1 4 6に進んで続行の指示が入力されているか否かを判断する。シミュレーションを続行する場合には、一定時間経過する間に続行が指示されている筈であるから、このステップ 1 4 6の判断が否定された場合には、続行の必要はなく終了してよいものと判断して、本ルーチンの一連の処理を終了する。

この一方、上記一定時間経過する間に続行が指示されている場合には、ステップ 1 0 2に戻り、以後、ステップ 1 0 2以下の処理、判断を繰り返すことにより、次の条件設定に応じてシミュレーションを続行する。但し、この場合には、フラグ Fが立っているので、ステップ 1 2 4における判断は肯定され、ステップ 1 2 4からステップ 1 3 6にジャンプすることとなる。

すなわち、投影光学系 P Lの波面収差の計測を一度行っている場合には、シミュレーション中は、再度波面収差の計測を行うことなく、シミュレーションが続行されることとなる。

このように、本実施形態では、オペレータは、画面の表示に従って入力装置 4 5を介して順次必要事項を入力するとともに、波面収差の計測指令を入力するだけで、あるいはこれらに加えて、重ね合わせ測定器で計測された各領域 $S_{i,j}$ についての位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) のデータを入力するだけで、ほぼ全自動で、対象パターンを特定した投影光学系 P Lの目的収差(コマ収差、非点収差、球面収差については低次成分のみでなく、高次成分をも含めて)が正確に算出され、表示装置 4 4に表示されるので、その収差を容易にかつ正確に認識することができる。しかも、複数種類の目的収差であっても、投影光学系 P Lの波面収差を1度計測するだけで、正確に知ることができる。この場合、最終的な目的収差の表示方法は、種々考えられるが、誰でもが見易く分かり易い形で、数値化して示すことが望ましい。このようにすると、ツェルニケ多項式の各項

の係数の分析等も不要となる。

また、図7のフローチャートから明らかなように、本実施形態の露光装置では、対象パターンに応じた最適露光条件の設定も容易に行うことが可能となっている。すなわち、ステップ102以下を複数回繰り返す際に、ステップ102の条件設定画面に対しては、同一の対象パターン、同一の目的収差（複数種類であっても構わない）を繰り返し入力し、ステップ108の投影光学系に関する情報の入力画面に対しては、異なる照明条件、開口数、波長等を順次入力することにより、最終的にステップ138で表示される目的収差の値が最小となる条件を、見付けることにより、最適露光条件をごく簡単に決定することができる。勿論、ソフトウェアを変更することにより、この最適露光条件の決定、及び決定結果に基づく最適露光条件の設定を主制御装置50が自動的に行うようにすることも可能である。例えば、照明条件は、照明系開口絞り板24の開口絞りを変更することにより変更が可能であり、また、投影光学系PLの開口数は、図1に示される投影光学系PLの瞳開口絞り15の調整により、ある範囲内であれば自在に設定可能であり、照明光ELの波長は、そのような制御情報TSを光源16に与えることにより変更可能となっているからである。

勿論、決定した露光条件の情報を、プロセスプログラムファイル（露光条件を設定するためのデータファイル）をオペレータが作成する際に用いても良い。

次に、露光装置メーカーのサービスエンジニア等によって半導体製造工場内で実施される投影光学系PLの結像特性の調整方法について説明する。

前提として、前述のようにして作成されたデータベースとともに、第1～第3プログラムが格納されたCD-ROMがドライブ装置46にセットされ、そのCD-ROMから第1～第3プログラムが記憶装置42にインストールされ、また、第2プログラムに付随するデータベースが記憶装置42に複写されているものとする。

まず、サービスエンジニア等により波面収差の計測指令が入力されると、主

制御装置 50 (CPU) では、投影光学系 PL の視野内の複数 (ここでは、 n 個) の計測点における波面収差の計測のための計測用レチクル R_T を用いたパターンのウエハ W 上への転写を、前述と同様の手順 (図 8 参照) で、実行する。そして、C/D 内で、そのウエハ W の現像が行われ、その現像後にウエハ W 上には、マトリックス状に配列された各領域 $S_{i,j}$ に図 9 B と同様の配置で計測用パターンと基準パターンとのレジスト像が形成される。

その後、現像が終了したウエハ W は、C/D から取り出され、外部の重ね合せ測定器 (レジストレーション測定器) を用いて、各領域 $S_{i,j}$ についての重ね合せ誤差の測定が行われ、この結果に基づいて、各計測用パターン $67_{i,j}$ のレジスト像の対応する基準パターン 74_1 に対する位置誤差 (位置ずれ) が算出される。

そして、この各領域 $S_{i,j}$ についての位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) のデータが、前述したサービスエンジニア等により、入力装置 45 を介して主制御装置 50 に入力される。なお、外部の重ね合せ測定器から、演算した各領域 $S_{i,j}$ についての位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) のデータを、オンラインにて主制御装置 50 に入力することも可能である。

いずれにしても、上記の入力に応答して、主制御装置 50 内の CPU では、第 1 プログラムをメインメモリにロードし、位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) に基づいて、各領域 $S_{i,j}$ に対応する、すなわち投影光学系 PL の視野内の第 1 計測点 ~ 第 n 計測点に対応する波面 (波面収差)、ここでは、ツェルニケ多項式の各項の係数、例えば第 2 項の係数 Z_2 ~ 第 37 項の係数 Z_{37} を第 1 プログラムに従って演算する。

以下の説明においては、この第 1 計測点 ~ 第 n 計測点に対応する波面 (波面収差) のデータを、次式 (8) のような列マトリックス Q で表現する。

$$Q = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \dots (8)$$

なお、上式(8)において、マトリックスQの要素 $P_1 \sim P_n$ は、それぞれがツェルニケ多項式の第2項～第37項の係数($Z_2 \sim Z_{37}$)から成る列マトリックス(縦ベクトル)である。

このようにして、マトリックスQを算出すると、主制御装置50内のCPUでは、その値をRAM内の一時記憶領域に格納する。

次に、主制御装置50内のCPUでは、記憶装置42から第2プログラムをメインメモリにロードし、第2プログラムに従って、前述した可動レンズ13₁～13₄の各自由度方向の調整量を演算する。具体的には、CPUでは、次のような演算を行う。

第1計測点～第n計測点に対応する波面(波面収差)のデータQと、前述したデータベースとしてCD-ROM内に格納されているマトリックスOと、可動レンズ13₁～13₄の各自由度方向の調整量Pとの間には、次式(9)のような関係が成立する。

$$Q = O \cdot P \dots (9)$$

上式(9)において、Pは、次式(10)で表されるm個の要素から成る列マトリックス(すなわち縦ベクトル)である。

$$P = \begin{bmatrix} ADJ1 \\ ADJ2 \\ \vdots \\ ADJm \end{bmatrix} \dots (10)$$

従って、上式(9)より、次式(11)の演算を行うことにより最小自乗法により、Pの各要素 $ADJ_1 \sim ADJ_m$ 、すなわち可動レンズ $13_1 \sim 13_4$ の各自由度方向の調整量(目標調整量)を求めることができる。

$$P = (O^T \cdot O) \cdot 1 \cdot O^T \cdot Q \quad \dots\dots (11)$$

上式(11)において、 O^T は、行列Oの転置マトリックスであり、 $(O^T \cdot O) \cdot 1$ は、 $(O^T \cdot O)$ の逆マトリックスである。

すなわち、第2プログラムは、上式(11)の最小自乗演算を、データベースを用いて行うためのプログラムである。従って、CPUでは、この第2プログラムに従って、CD-ROM内のデータベースをRAM内に順次読み込みつつ、調整量 $ADJ_1 \sim ADJ_m$ を算出し、表示装置44の画面上に表示するとともに、その値を、記憶装置42に記憶する。

次に、主制御装置50では、記憶装置42に記憶された調整量 $ADJ_1 \sim ADJ_m$ に従って、可動レンズ $13_1 \sim 13_4$ を各自由度方向に駆動すべき旨の指令値を、結像特性補正コントローラ48に与える。これにより、結像特性補正コントローラ48により、可動レンズ $13_1 \sim 13_4$ をそれぞれの自由度方向に駆動する各駆動素子に対する印加電圧が制御され、可動レンズ $13_1 \sim 13_4$ の位置及び姿勢の少なくとも一方がほぼ同時に調整され、投影光学系PLの結像特性、例えばディストーション、像面湾曲、コマ収差、球面収差、及び非点収差等が補正される。なお、コマ収差、球面収差、及び非点収差については、低次のみならず高次の収差をも補正可能である。

このように、本実施形態では、投影光学系PLの結像特性の調整時には、サービスインジニア等が、入力装置45を介して波面収差の計測指令を入力するだけで、あるいはこれに加えて、重ね合わせ測定器で計測された各領域 $S_{i,j}$ についての位置ずれ($\Delta \xi, \Delta \eta$)のデータを入力するだけで、ほぼ全自動で、投影光学系PLの結像特性が高精度に調整されるようになっている。

なお、上記式(11)の演算に変えて、次式(12)の最小自乗演算を行う

ための演算プログラムを、第2プログラムとして採用することも可能である。

$$P = (O^T \cdot G \cdot O) \cdot I \cdot O^T \cdot G \cdot Q \quad \dots\dots (12)$$

上式(12)において、Gは、次式(13)で表されるn行n列の対角線マトリックスである。

$$G = \begin{bmatrix} A_{1,1} & & & & 0 \\ & A_{2,2} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & A_{n,n} \end{bmatrix} \quad \dots(13)$$

また、マトリックスGの要素 $A_{i,i}$ ($i = 1 \sim n$)は、重みパラメータ δ を要素とする対角線マトリックスである。この場合、 $A_{i,i}$ は、次式(14)で表される36行36列の対角線マトリックスである。

$$A_{i,i} = \begin{bmatrix} \delta_{1,1} & & & & 0 \\ & \delta_{2,2} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & \delta_{36,36} \end{bmatrix} \quad \dots(14)$$

従って、対角線マトリックス $A_{i,i}$ の要素 $\delta_{j,j}$ ($j = 1 \sim 36$)のそれぞれが、各計測点で計測された波面収差に対応するツェルニケ多項式の第2項～第37項の係数 $Z_2 \sim Z_{37}$ それぞれに対する重みパラメータに相当する。そこで、

例えば、いずれか一つの計測点又は任意の複数の計測点の計測結果から得られた低次のディストーションを特に修正したい場合には、対応する計測点における重みパラメータ $\delta_{1,1}$, $\delta_{2,2}$ の値を、残りの重みパラメータに比べて大きくすれば良い。また、例えば、いずれか一つの計測点又は任意の複数の計測点の計測結果から得られた球面収差 (0θ 成分) を高次成分を含めて特に修正したい場合には、対応する計測点における重みパラメータ $\delta_{8,8}$, $\delta_{15,15}$, $\delta_{24,24}$, $\delta_{35,35}$, $\delta_{36,36}$ のトータルの平均値を、残りの重みパラメータのトータルの平均値より大きくなるように、重みパラメータ δ を設定すれば良い。

この場合、例えば、第2プログラムに連動する別のプログラムを用意し、このプログラムにより、計測点の指定画面、及びツェルニケ多項式の各項の重みの入力画面が表示装置44のディスプレイに順次表示されるようにすることが望ましい。このようにすると、サービスエンジニア等が入力装置45を用いて、その計測点の指定画面が表示されたときに計測点を入力し、重みの入力画面が表示されたときに特に修正を希望する収差に応じたツェルニケ多項式の項の重みを他の項より大きくして重みを入力することにより、上述した重みパラメータの設定を容易に行うことができる。特に、重みの入力画面では、上述した複数の種類の入力、具体的には、各項別の重みの入力の他、 0θ 、 1θ 、 3θ 、 4θ 等に区分けした重みの入力ができるようにすることが望ましい。後者の場合、各 θ 毎に所望の規定値を入力できるようにすることができる。なお、 0θ とはツェルニケ多項式の各項の係数の内の \sin , \cos を含まない項(但し、ここでは第1項、第4項は除くものとする)の係数 (Z_9 , Z_{16} , Z_{25} , Z_{36} , Z_{37}) の総称であり、 1θ とは $\sin \theta$, $\cos \theta$ のいずれかを含む項(但し、ここでは第2項、第3項は除くものとする)の係数 (Z_7 , Z_8 , Z_{14} , Z_{15} , Z_{23} , Z_{24} , Z_{34} , Z_{35}) の総称であり、 2θ とは、 $\sin 2\theta$, $\cos 2\theta$ のいずれかを含む項の係数 (Z_5 , Z_6 , Z_{12} , Z_{13} , Z_{21} , Z_{22} , Z_{32} , Z_{33}) の総称であり、 3θ とは、 $\sin 3\theta$, $\cos 3\theta$ のいずれかを含む項

の係数 (Z_{19} , Z_{20} , Z_{30} , Z_{31}) の総称であり、 4θ とは、 $\sin 4\theta$, $\cos 4\theta$ のいずれかを含む項の係数 (Z_{28} , Z_{29}) の総称である。

ところで、本実施形態では、前述したように、オペレータなどが、画面の表示に従って入力装置 45 を介して順次必要事項を入力するとともに、波面収差の計測指令を入力するだけで、あるいはこれらに加えて、重ね合わせ測定器で計測された各領域 $S_{i,j}$ についての位置ずれ ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) のデータを入力するだけで、主制御装置 50 により第 3 プログラム及び第 1 プログラムに従って処理がなされ、ほぼ全自動で、投影光学系 PL の知りたい結像特性 (収差) を認識することができるようになっている。従って、これを利用して、前述のようにして投影光学系 PL の結像特性の調整を行った後に、サービスエンジニア等は、前述したシミュレーションを行うことにより、投影光学系の結像特性が予定通りに調整されているか否かを、画面の表示に基づいて確認することができる。予定通りに調整されていない場合にも、目的とする結像特性に関する情報として複数の結像特性を入力することにより、どの結像特性が予定通りに調整されていないかを認識できるので、必要な対応策を迅速に施すことが可能となる。

本実施形態では、メンテナンス時以外の通常の使用時に、必要に応じて、オペレータなどの指示に基づき、投影光学系 PL の結像特性を調整することもできる。オペレータ等が、前述の所定の指示 (条件設定入力、投影光学系に関する情報の入力等も含む) 行くと、主制御装置 50 内の CPU により上述したシミュレーションと同様の手順で同様の処理が行われ、同様のツェルニケ変化表が作成される。そして、波面収差の計測が実行され、位置ずれのデータが入力されると、主制御装置 50 内の CPU により、上述と同様にして目的とする結像特性が順次算出される。この場合において、CPU では、目的とする結像特性に関する情報を、表示装置 44 の画面上に表示するのに変えて、あるいは表示とともに、それらの目的収差が最適となる (例えば零ないし最小

となる) ような可動レンズ 13₁ ~ 13₄ の各自由度方向の駆動量を、例えば前述の第2プログラムに従って前述と同様にして最小自乗法により算出することとしても良い。このようなことは、ソフトウェアの簡単な変更により実現できる。

そして、主制御装置50内のCPUでは、その算出した駆動量の指令値を、結像特性補正コントローラ48に与える。これにより、結像特性補正コントローラ48により、可動レンズ13₁ ~ 13₄ をそれぞれの自由度方向に駆動する各駆動素子に対する印加電圧が制御され、可動レンズ13₁ ~ 13₄ の少なくとも1つの位置及び姿勢の少なくとも一方が調整され、投影光学系PLの目的とする結像特性、例えばディストーション、像面湾曲、コマ収差、球面収差、及び非点収差等が補正される。なお、コマ収差、球面収差、及び非点収差については、低次のみならず高次の収差をも補正可能である。

ところで、本実施形態の露光装置10では、半導体デバイスの製造時には、レチクルとしてデバイス製造用のレチクルRがレチクルステージRST上に装填され、その後、レチクルアライメント及びいわゆるベースライン計測、並びにEGA（エンハンスド・グローバル・アライメント）等のウエハアライメントなどの準備作業が行われる。

なお、上記のレチクルアライメント、ベースライン計測等の準備作業については、例えば特開平4-324923号公報及びこれに対応する米国特許第5243195号に詳細に開示され、また、これに続くEGAについては、特開昭61-44429号公報及びこれに対応する米国特許第4,780,617号等に詳細に開示されており、本国際出願で指定した指定国又は選択した選択国の国内法令が許す限りにおいて、上記各公報並びにこれらに対応する上記米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

その後、前述した波面収差の計測時と同様のステップ・アンド・リピート方式の露光が行われる。但し、この場合、ステッピングは、ウエハアライメント

結果に基づいて、ショット間を単位として行われる。なお、露光時の動作等は通常のステッパと異なることがないので、詳細説明については省略する。

次に、露光装置 10 の製造方法について説明する。

露光装置 10 の製造に際しては、まず、複数のレンズ、ミラー等の光学素子などを含む照明光学系 12、投影光学系 PL、多数の機械部品から成るレチクルステージ系やウエハステージ系などを、それぞれユニットとして組み立てるとともに、それぞれユニット単体としての所望の性能を発揮するように、光学的な調整、機械的な調整、及び電気的な調整等を行う。

次に、照明光学系 12 や投影光学系 PLなどを露光装置本体に組むとともに、レチクルステージ系やウエハステージ系などを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続する。

次いで、照明光学系 12 や投影光学系 PLについては、光学的な調整を更に行う。これは、露光装置本体への組み付け前と組み付け後とでは、それらの光学系、特に投影光学系 PLの結像特性が微妙に変化するからである。本実施形態では、この露光装置本体への組み込み後に行われる投影光学系 PLの光学的な調整に際しても、前述した第 1 プログラム、第 2 プログラム及びデータベース、第 3 プログラム等を有効に活用することができる。

投影光学系 PLの光学的な調整の第 1 の方法として、調整作業を行う作業者は、前述した計測用レチクル R_T を用いて前述した手順で、投影光学系 PLの波面収差の計測を行う。そして、この波面収差の計測結果を主制御装置 50 に入力することにより、主制御装置 50 により前述した第 1、第 2 プログラムに従った処理が行われ、投影光学系 PLの結像特性が可能な限り高精度に調整される。

そして、調整結果を確認する目的で、再度前述した計測用レチクル R_T を用いて前述した手順で、投影光学系 PLの波面収差の計測を行う。そして、この波面収差の計測結果を主制御装置 50 に入力することにより、主制御装置 50

により前述した第1、第3プログラムに従った処理が行われ、その調整後の投影光学系PLの非点収差、像面湾曲、あるいはコマ収差に対応する線幅異常値などが画面上に表示される。この段階で、修正されていない収差、主として高次収差は自動調整が困難な収差であると判断できるので、必要であればレンズ等の組付けを再調整する。

投影光学系PLの光学的な調整の第2の方法としては、製造段階の調整作業を行う作業者は、前述した調整時と同様に、指示（条件設定入力、投影光学系に関する情報の入力等も含む）を入力することにより、主制御装置50内のCPUにより第3プログラムに従った処理が行われ、同様のツェルニケ変化表が作成される。そして、前述した計測用レチクル R_T を用いて前述した手順で、投影光学系PLの波面収差の計測を行う。そして、この波面収差の計測結果を主制御装置50に入力することにより、主制御装置50内のCPUにより、前述した第1、第3プログラムに従った処理が行われ、目的収差が順次算出され、それらの目的収差が最適となる（例えば、零ないし最小となる）ような可動レンズ13₁～13₄の各自由度方向の駆動量の指令値が、結像特性補正コントローラ48に与えられる。これにより、結像特性補正コントローラ48により、投影光学系PLの目的とする結像特性、例えばディストーション、像面湾曲、コマ収差、球面収差、及び非点収差等が可能な限り高精度に調整される。

そして、調整結果を確認する目的で、再度前述したシミュレーションを実行し、その調整後の投影光学系PLの非点収差、像面湾曲、あるいはコマ収差に対応する線幅異常値などを画面上に表示させる。この段階で、修正されていない収差、主として高次収差は自動調整が困難な収差であると判断できるので、必要であればレンズ等の組付けを再調整する。

なお、上記の再調整により所望の性能が得られない場合などには、一部のレンズを再加工又は交換する必要も生じる。なお、投影光学系PLの光学素子の再加工を容易に行うため、投影光学系PLを露光装置本体に組み込む前に前述

の波面収差を専用の波面計測装置等を用いて計測し、この計測結果に基づいて再加工が必要な光学素子の有無や位置などを特定し、その光学素子の再加工と他の光学素子の再調整とを並行して行うようにしても良い。

また、投影光学系P Lの光学素子単位でその交換などを行っても良いし、あるいは複数の鏡筒を有する投影光学系ではその鏡筒単位で交換などを行っても良い。更に、光学素子の再加工では必要に応じてその表面を非球面に加工しても良い。また、投影光学系P Lの調整では光学素子の位置（他の光学素子との間隔を含む）や傾斜などを変更するだけでも良いし、特に光学素子がレンズエレメントであるときはその偏心を変更したり、あるいは光軸A Xを中心として回転させても良い。

その後、更に総合調整（電気調整、動作確認等）をする。これにより、光学特性が高精度に調整された投影光学系P Lを用いて、レチクルRのパターンをウエハW上に精度良く転写することができる、本実施形態の露光装置10を製造することができる。なお、露光装置の製造は温度及びクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

これまでの説明から明らかなように、本実施形態では、主制御装置50によって演算装置、第1演算装置及び第2演算装置が構成され、主制御装置50と結像特性補正コントローラ48とによって結像特性調整装置が構成されている。更に、本実施形態では、計測用レチクルR_T、外部の重ね合せ測定器、及び主制御装置50によって、投影光学系P Lの波面収差を計測する計測装置が構成されている。

以上詳細に説明したように、本実施形態の露光装置によると、オペレータの指示に基づき、計測装置（R_T、50等）により投影光学系P Lの波面収差が計測されると、主制御装置50により、その計測された投影光学系P Lの波面収差と、対象とするパターンを焼き付けたときに与えられた収差の情報に応じた目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて、投影光学系P Lの目

的とする結像特性が算出される。このように、ツェルニケ変化表を用いることにより、1度波面収差の計測を行うのみで、目的とする結像特性を算出することが可能となる。この場合、計測は、球面収差、非点収差、コマ収差については低次収差のみでなく、高次収差を含んだ総合的な収差を算出することができる。

また、前記目的収差（結像特性）の算出結果に基づいて、結像特性補正装置（48、50）によりその目的とする結像特性が可能な限り補正されるので、投影光学系PLの結像特性が対象パターンに応じて調整されることとなる。

また、本実施形態の露光装置10によると、調整用の特定の光学素子（可動レンズ13₁～13₄）の調整と投影光学系PLの結像特性の変化との関係を示すパラメータ群が予め求められ、そのパラメータ群がデータベースとして記憶装置42に予め記憶されている。そして、調整時にサービスエンジニア等の指示に基づき、投影光学系PLの波面収差が実際に計測され、その計測データ（実測データ）が入出力装置44を介して入力されると、主制御装置50により、入出力装置44を介して入力された波面収差の実測データと前記パラメータ群と可動レンズ13₁～13₄の目標調整量との関係式（前述した式（11）又は式（12））を用いて、可動レンズ13₁～13₄の目標調整量が算出される。このように、上記のパラメータが予め求められ記憶装置44に記憶されているので、実際に波面収差を計測した際には、その波面収差の実測値を入出力装置44を介して入力するだけで、その波面収差を補正する可動レンズ13₁～13₄の目標調整量を容易に算出することができる。この場合、入手が困難なレンズの設計データ等は不要であり、また、面倒な光線追跡計算等も不要である。

そして、主制御装置50からその算出された目標調整量が結像特性補正コントローラ48に対して指令値として与えられ、結像特性補正コントローラ48によりその目標調整量に応じて可動レンズ13₁～13₄が調整されることにより、投影光学系PLの結像特性を容易にかつ高精度に調整されることとなる。

また、本実施形態の露光装置 10 によると、露光の際には、上述のようにして結像特性が対象パターンに応じて調整された、あるいは波面収差の計測結果に基づいて結像特性が高精度に調整された投影光学系 PL を介してレチクル R のパターンがウエハ W 上に転写されるので、微細パターンを重ね合せ精度良くウエハ W 上に転写することが可能になっている。

なお、上記実施形態では、シミュレーション時に、対象とするパターンの情報、目的とする結像特性の情報、投影光学系に関する情報、及び与えたい収差の情報を含む各種情報をキーボード等の入力装置 45 から主制御装置 50 に入力し、それらの入力された情報に基づいて主制御装置 50 が前記対象とするパターンを焼き付けたときの前記与えられた収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する場合について説明したが、本発明がこれに限定されるものではない。すなわち、主制御装置 50 とは別のシミュレーション用コンピュータに第 3 プログラムをインストールし、対象となるパターン、投影光学系に関する情報等を種々仮定し、各仮定に基づいて、条件設定を順次変更しながら、目的収差の情報、投影光学系に関する情報、与えたい収差の情報を変更しながら、繰り返し入力作業を行って、入力内容に対応する種々のツェルニケ変化表を予め作成し、これらの変化表から成るデータベースを作成し、このデータベースを第 1、第 2 プログラムとともに CD-ROM 内に格納しておいても良い。

上述したような種々のツェルニケ変化表から成るデータベースを予め作成する場合には、波面収差の計測結果の入力と条件設定入力とを行うのみで、これに回答して該当するツェルニケ変化表を用いて前述の演算を行い、直ちに目的収差を算出、表示する処理を、主制御装置 50 内の CPU に実行させる、前述の第 3 のプログラムを簡略化した別のプログラム（以下、便宜上「第 4 プログラム」と呼ぶ）を用意し、この第 4 プログラムを、上記の CD-ROM に格納しておく。

そして、シミュレーションに際しては、CD-ROM内の第1、第4プログラムを記憶装置42にインストールすると同時にツェルニケ変化表から成るデータベースを記憶装置42にコピーする。あるいは、CD-ROM内の第1、第4プログラムのみを記憶装置42にインストールしドライブ装置46内にCD-ROMをセットしたままにしておいても良い。後者の場合、シミュレーション時には、主制御装置50によりCD-ROMからツェルニケ変化表のデータが適宜必要に応じて読み出されることとなる。この場合、ドライブ装置46内にセットされているCD-ROMが記憶装置を構成することとなる。このようなことは、ソフトウェアの変更により容易に実現可能である。

なお、上記実施形態では、投影光学系の結像特性として総合的な収差である波面収差を計測し、この計測結果に応じてその波面収差を補正するための可動レンズ（調整用の特定の光学素子）の目標調整量を算出する場合について説明したが、本発明がこれに限定されるものではない。例えば、投影光学系の調整対象の結像特性を、コマ収差、ディストーションなどの個々の結像特性としても良い。この場合、例えば、調整用の特定の光学素子の各自由度方向への単位量の調整と、コマ収差、ディストーションなどの個々の結像特性の変化量との関係を、シミュレーションにより求め、その結果に基づいて特定光学素子の調整と投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群を求め、そのパラメータ群をデータベースとして作成する。そして、実際の投影光学系の結像特性の調整の際には、例えば前述した焼き付け法、あるいは空間像計測法によって投影光学系のコマ収差（線幅異常値）、ディストーションなどを求め、その計測値を主制御装置に入力することにより、その求めた結像特性とパラメータ群と特定の光学素子の目標調整量との関係式（この関係式は予め用意しておく）を用いて、上記実施形態と同様にして特定の光学素子の目標調整量を演算により決定することができる。

また、上記実施形態では、計測用レチクルを用いて投影光学系PLの波面収

差の計測を行う場合について説明したが、これに限らず、ウエハステージWSTに着脱できる方式のポータブルな波面収差計測器を用いて、波面収差の計測を、オン・ボディにて行うようにしても良い。このような波面収差計測器としては、例えば図10に示されるような、受光光学系内にマイクロレンズアレイを用いたシャック・ハルトマン (Shack-Hartmann) 方式の波面収差計測器80などを用いることができる。

ここで、この波面収差計測器80の構成等について簡単に説明する。この波面収差計測器80は、図10に示されるように、YZ断面がL字状の内部空間を有する筐体82と、該筐体82の内部に所定の位置関係で配置された複数の光学素子から成る受光光学系84と、筐体82の内部の+Y側端部に配置された受光部86とを備えている。

前記筐体82は、YZ断面L字状で内部に空間が形成された部材から成り、その最上部(+Z方向端部)には、筐体82の上方からの光が筐体82の内部空間に向けて入射するように、平面視円形の開口82aが形成されている。また、この開口82aを筐体82の内部側から覆うようにカバーガラス88が設けられている。カバーガラス88の上面には、クロム等の金属の蒸着により中央部に円形の開口を有する遮光膜が形成され、該遮光膜によって投影光学系PLの波面収差の計測の際に周囲からの不要な光が受光光学系84に入射するのが遮られている。

前記受光光学系84は、筐体82の内部のカバーガラス88の下方に、上から下に順次配置された、対物レンズ84a、リレーレンズ84b、折り曲げミラー84cと、該折り曲げミラー84cの+Y側に順次配置されたコリメータレンズ84d、及びマイクロレンズアレイ84eから構成されている。折り曲げミラー84cは、 45° で斜設されており、該折り曲げミラー84cによって、上方から鉛直下向きに対物レンズ84aに対して入射した光の光路がコリメータレンズ84dに向けて折り曲げられるようになっている。なお、この受

光光学系 8 4 を構成する各光学部材は、筐体 8 2 の壁の内側に不図示の保持部材を介してそれぞれ固定されている。前記マイクロレンズアレイ 8 4 e は、複数の小さな凸レンズ（レンズエレメント）が光路に対して直交する面内にアレイ状に配置されて構成されている。

前記受光部 8 6 は、2 次元 C C D 等から成る受光素子と、例えば電荷転送制御回路等の電気回路等から構成されている。受光素子は、対物レンズ 8 4 a に入射し、マイクロレンズアレイ 8 4 e から出射される光束のすべてを受光するのに十分な面積を有している。なお、受光部 8 6 による計測データは、不図示の信号線を介して主制御装置 5 0 に出力される。

次に、この波面収差計測器 8 0 を用いた波面収差の計測方法について説明する。なお、以下の説明においては、説明の簡略化のため、波面収差計測器 8 0 内の受光光学系 8 4 の収差は無視できる程小さいものとする。

まず、通常の露光時には、波面収差計測器 8 0 は、Z チルトステージ 5 8 から取り外されているため、波面計測に際しては、オペレータにより Z チルトステージ 5 8 の側面に対して波面収差計測器 8 0 を取り付ける作業が行われる。この取付けに際しては、波面計測時に波面収差計測器 8 0 が、ウエハステージ W S T （Z チルトステージ 5 8）の移動ストローク内に収まるように、所定の基準面（ここでは + Y 側の面）にボルトあるいはマグネット等を介して固定される。

上記の取付け終了後、オペレータによる計測開始のコマンドの入力に応じて、主制御装置 5 0 では、前述のオフアクシス方式のアライメント系の下方に波面収差計測器 8 0 が位置するように、ウエハステージ駆動部 5 6 を介してウエハステージ W S T を移動させる。そして、主制御装置 5 0 では、アライメント系により波面収差計測器 8 0 に設けられた不図示の位置合わせマークを検出し、その検出結果とそのときのレーザ干渉計 5 4 W の計測値とに基づいて位置合わせマークの位置座標を算出し、波面収差計測器 8 0 の正確な位置を求める。

そして、波面収差計測器 80 の位置計測後、主制御装置 50 を中心として以下のようにして波面収差の計測が実行される。

まず、主制御装置 50 は、不図示のレチクルローダによりピンホールパターンが形成された不図示の計測用レチクル（以下、前述した計測用レチクル R_T との識別のため、「ピンホールレチクル」と呼ぶ）をレチクルステージ RST 上にロードする。この計測用レチクルは、そのパターン面の照明領域 IAR と同一の領域内の複数点にピンホール（ほぼ理想的な点光源となって球面波を発生するピンホール）が形成された専用のレチクルである。

なお、ここで用いられるピンホールレチクルには、上面に拡散面を設けるなどして、投影光学系 PL の全ての $N.A.$ を通過する光線の波面を求めることができるように、すなわち、投影光学系 PL の全 $N.A.$ に亘る波面収差が計測されるようになっているものとする。

ピンホールレチクルのロード後、主制御装置 50 では、前述のレチクルアライメント顕微鏡を用いて、ピンホールレチクルに形成されたレチクルアライメントマークを検出し、その検出結果に基づいて、ピンホールレチクルを所定の位置に位置合わせする。これにより、ピンホールレチクルの中心と投影光学系 PL の光軸とがほぼ一致する。

この後、主制御装置 50 では、光源 16 に制御情報 TS を与えてレーザ光を発光させる。これにより、照明光学系 12 からの照明光 EL が、ピンホールレチクルに照射される。そして、ピンホールレチクルの複数のピンホールから射出された光が投影光学系 PL を介して像面上に集光され、ピンホールの像が像面に結像される。

次に、主制御装置 50 は、ピンホールレチクル上のいずれかのピンホール（以下においては、着目するピンホールと呼ぶ）の像が結像する結像点に波面収差計測器 80 の開口 82a のほぼ中心が一致するように、ウエハレーザ干渉計 54W の計測値をモニタしつつ、ウエハステージ駆動部 56 を介してウエハステ

ージWSTを移動する。この際、主制御装置50では、前述の焦点位置検出系の検出結果に基づいて、ピンホール像が結像される像面に波面収差計測器80のカバーガラス88の上面を一致させるべく、ウエハステージ駆動部56を介してウエハステージWSTをZ軸方向に微少駆動する。このとき、必要に応じてウエハステージWSTの傾斜角も調整する。これにより、着目するピンホールの像光束がカバーガラス88の中央の開口を介して受光光学系84に入射し、受光部86を構成する受光素子によって受光される。

これを更に詳述すると、ピンホールレチクル上の着目するピンホールからは球面波が発生し、この球面波が、投影光学系PL、及び波面収差計測器80の受光光学系84を構成する対物レンズ84a、リレーレンズ84b、ミラー84c、コリメータレンズ84dを介して平行光束となって、マイクロレンズアレイ84eを照射する。これにより、投影光学系PLの瞳面がマイクロレンズアレイ84eにリレーされ、分割される。そして、このマイクロレンズアレイ84eの各レンズエレメントによってそれぞれの光が受光素子の受光面に集光され、該受光面にピンホールの像がそれぞれ結像される。

このとき、投影光学系PLが、波面収差の無い理想的な光学系であるならば、投影光学系PLの瞳面における波面は理想的な波面（ここでは平面）になり、その結果マイクロレンズアレイ84eに入射する平行光束が平面波となり、その波面は理想的な波面となる筈である。この場合、図11Aに示されるように、マイクロレンズアレイ84eを構成する各レンズエレメントの光軸上の位置にスポット像（以下、「スポット」とも呼ぶ）が結像する。

しかるに、投影光学系PLには通常、波面収差が存在するため、マイクロレンズアレイ84eに入射する平行光束の波面は理想的な波面からずれ、そのずれ、すなわち波面の理想波面に対する傾きに依じて、図11Bに示されるように、各スポットの結像位置がマイクロレンズアレイ84eの各レンズエレメントの光軸上の位置からずれることとなる。この場合、各スポットの基準点（各

レンズエレメントの光軸上の位置)からの位置のずれは、波面の傾きに対応している。

そして、受光部 86 を構成する受光素子上の各集光点に入射した光 (スポット像の光束) が受光素子でそれぞれ光電変換され、該光電変換信号が電気回路を介して主制御装置 50 に送られ、主制御装置 50 では、その光電変換信号に基づいて各スポットの結像位置を算出し、更に、その算出結果と既知の基準点の位置データとを用いて、位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) を算出して RAM に格納する。このとき、主制御装置 50 には、レーザ干渉計 54W のそのときの計測値 (X_i , Y_i) が供給されている。

上述のようにして、1つの着目するピンホール像の結像点における波面収差計測器 80 による、スポット像の位置ずれの計測が終了すると、主制御装置 50 では、次のピンホール像の結像点に、波面収差計測器 80 の開口 82a のほぼ中心が一致するように、ウエハステージ WST を移動する。この移動が終了すると、前述と同様にして、主制御装置 50 により、光源 16 からレーザ光の発光が行われ、同様にして主制御装置 50 によって各スポットの結像位置が算出される。以後、他のピンホール像の結像点で同様の計測が順次行われる。

このようにして、必要な計測が終了した段階では、主制御装置 50 の RAM には、前述した各ピンホール像の結像点における位置ずれデータ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) と、各結像点の座標データ (各ピンホール像の結像点における計測を行った際のレーザ干渉計 54W の計測値 (X_i , Y_i)) とが格納されている。

そこで、主制御装置 50 では、RAM 内に格納されたピンホール像の結像点に対応する投影光学系 PL の瞳面における波面の傾きに対応する位置ずれ ($\Delta \xi$, $\Delta \eta$) に基づいて、前述した第 1 プログラムと同様の別の変換プログラムを用いて、波面のデータ (ツェルニケ多項式の各項の係数) を算出する。ここで、第 1 プログラムと同様の変換プログラムとしたのは、前述した波面収差計測器 80 を用いる場合には、第 1 プログラムと異なる計測されたスポット像の

結像点の位置ずれ量をツェルニケ多項式の各項の係数に変換する別のプログラムが用意されるのが通常だからである。

以上の説明からわかるように、波面収差計測器 80 を用いて波面収差を計測する場合には、ウエハの現像等が不要になるので、計測時間の短縮が期待される。また、ウエハの現像等が不要になるので、波面収差計測器 80 をウエハステージ WST に装着した状態では、露光装置 10 自身でいわゆる自己計測が可能となるというメリットもある。その後、主制御装置 50 では、上記実施形態と同様の手順に従った処理を実行することにより、目的収差（結像特性）の算出、表示、更には投影光学系 PL の結像特性の調整を自動的に行うことも可能となる。

なお、上記実施形態では、計測レチクル R_T を用いて計測された位置ずれ量をツェルニケ多項式の各項の係数に変換する第 1 プログラム、該第 1 プログラムで変換されたツェルニケ多項式の各項の係数に基づいて結像特性の調整量を演算する第 2 プログラム、第 1 プログラムで変換されたツェルニケ多項式の各項の係数を諸収差（諸収差の指標を含む）に変換する第 3 プログラム、及び第 2 プログラムに付属するデータベースが、単一の CD-ROM にパッケージングされている場合について説明したが、必ずしもこのようにする必要性は全くない。すなわち、第 1 プログラム、第 2 プログラム（及びデータベース）、第 3 プログラムは、それぞれ別々の目的のプログラムであり、いずれも単独で十分に使用価値がある。

特に、第 3 プログラムは、その一部のツェルニケ変化表を作成する部分（ステップ 101～122 部分に相当）のみでも単一のプログラムとして使用することが可能である。かかるプログラムがインストールされたコンピュータに、対象とするパターンの情報、目的とする結像特性の情報、投影光学系に関する情報、及び与えたい収差の情報を含む各種情報をキーボード等の入力装置から入力することにより、目的とする結像特性のツェルニケ変化表が作成される。

従って、このようにして作成されたツェルニケ変化表から成るデータベースを前述したように他の露光装置で好適に使用することができる。

例えば、前述した波面収差計測器を用いる場合には、第1プログラムと異なる計測されたスポット像の結像点の位置ずれ量をツェルニケ多項式の各項の係数に変換する別のプログラムが用意されるのが通常であり、このような変換プログラムと組み合わせても第2プログラム及びデータベース、第3プログラムは、十分にその威力を発揮することは明らかである。

また、特に第2プログラムと第3プログラムとは、その目的が大きく相違するため、必ずしも組み合わせる必要はない。前者は、露光装置の修理調整に当たるサービスエンジニア等が投影光学系の結像特性を調整する際の作業を効率化するためのものであり、後者は、半導体製造工場の露光装置のオペレータ等が露光対象のパターンを焼き付けたときに投影光学系の目的とする結像特性が十分に良好であるかどうかを確認するシミュレーションを目的とする。かかる目的の相違を考慮すれば、上記実施形態のように第2プログラム及びデータベースと、第3プログラムとを同一のソフトウェアプログラムとする場合には、例えば、パスワードを2種類設定可能としておいても良い。このような場合には、第2プログラム及び第3プログラムを別の情報記録媒体、例えばいわゆるファームウェアとして供給し、データベース部分のみをCD-ROM等の情報記憶媒体に記録するようにしても良い。

また、上記実施形態では、投影光学系PLの結像特性の調整に際しては、CD-ROMから第1～第3プログラムが記憶装置42にインストールされ、また、データベースが記憶装置42に複写されているものとしたが、これに限らず、CD-ROMから第1～第3プログラムのみを記憶装置42にインストールしておけば、データベースは記憶装置42に複写しなくても良い。この場合には、ドライブ装置にセットされたCD-ROMによって記憶装置が構成されることになる。

なお、上記実施形態でデータベースが、可動レンズ $13_1 \sim 13_4$ の各自由度方向の単位量の駆動に対応するパラメータ群により構成される場合について説明したが、これに限らず、投影光学系PLを構成するレンズの一部が容易に交換できるようになっている場合等には、そのレンズの厚さの変化に対応する結像特性の変化を示すパラメータをデータベースに含めても良い。かかる場合には、目標調整量として最適なレンズの厚さが算出されることとなる。その外、レチクルのローテーション（回転）に対応する結像特性の変化を示すパラメータをデータベースに含めても良い。この場合、例えば、図2Fに示されるように、レチクルRが回転する場合を、ローテーションの+（正）方向とし、単位ローテーションを0.1度としても良い。この場合、算出されたレチクルローテーションに応じて、例えばレチクルステージRSTとウエハステージWSTとの少なくとも一方を回転させれば良い。その他、その変動が投影光学系の結像特性に影響を与え、かつその調整が可能なもの、例えば照明光の中心波長、レチクル等の光軸方向位置などもデータベースに含めることは可能である。

また、上記実施形態では、主制御装置50が第2プログラムに従って演算した特定の光学素子の目標調整量に基づいて、あるいは、第3プログラムに従って演算した目的収差に基づいて、結像特性補正コントローラ48を介して投影光学系PLの結像特性を自動的に調整するものとしたが、これに限らず、オペレータによるマニュアル操作、あるいは作業を介して投影光学系PLの結像特性を調整するようにしても良い。かかる場合には、調整段階のみならず、製造段階においても第2プログラムあるいは第3プログラムを有効に用いることができ、これにより結像特性が調整された投影光学系そのものを製造することができる。

なお、上記実施形態では、計測用レチクル R_T に計測用パターンとともに、基準パターンが設けられる場合について説明したが、基準パターンは、光学特性計測用マスク（上記実施形態では計測用レチクル R_T ）に設ける必要はない。

すなわち、基準パターンを別のマスクに設けても良いし、基準パターンをマスク側に設けることなく、基板（ウエハ）側に設けても良い。すなわち、基準パターンが投影倍率に応じた大きさで予め形成された基準ウエハを用い、その基準ウエハ上にレジストを塗布し、そのレジスト層に計測用パターンを転写して、現像を行い、その現像後に得られる計測用パターンのレジスト像と基準パターンとの位置ずれを計測するようにすることにより、実質的に上記実施形態と同様の計測が可能となる。

また、上記実施形態では、計測用パターン及び基準パターンをウエハW上に転写した後に、そのウエハを現像して得られるレジスト像の計測結果に基づいて、投影光学系PLの波面収差を算出するものとしたが、これに限らず、計測用パターンの投影像（空間像）をウエハ上に投影し、その投影像（空間像）を空間像計測器などを用いて計測し、あるいはレジスト層に形成された計測用パターン及び基準パターンの潜像あるいはウエハをエッチングして得られる像を計測することとしても良い。かかる場合であっても、計測用パターンの基準位置（例えば設計上の計測用パターンの投影位置）からの位置ずれを計測すれば、その計測結果に基づいて上記実施形態と同様の手順で投影光学系の波面収差を求めることは可能である。また、計測用パターンをウエハ上に転写する代わりに、予め計測用パターンが形成された基準ウエハを準備しておき、この基準ウエハ上のレジスト層に基準パターンを転写してその位置ずれを計測しても良いし、あるいは計測用パターンに対応する複数の開口を有する空間像計測器を用いてその両者の位置ずれを計測するようにしても良い。更に、上記実施形態では前述した位置ずれを重ね合せ測定器を用いて計測するものとしたが、それ以外、例えば露光装置内に設けられるアライメントセンサなどを用いても良い。

また、上記実施形態ではツェルニケ多項式の第37項までを用いるものとしたが、第38項以上を用いても良く、例えば第81項までを用いて、投影光学系PLの各収差の高次成分も算出しても良い。すなわち、ツェルニケ多項式で

使用する項の数や番号は任意で構わない。更に、照明条件などによっては、投影光学系PLの収差を積極的に発生させることもあるので、上記実施形態では目的収差を常に零ないし最小とするだけでなく、目的収差を所定値となるように投影光学系PLの光学素子を調整しても良い。

更に、上記実施形態ではサービスエンジニアが前述したプログラムのインストールなどを行うものとしたが、例えば露光装置などの製造装置や多数の製造装置などを含む製造ラインを統括管理するホストコンピュータなどとインターネットなどで接続されるサーバー、あるいは露光装置に前述のプログラムを格納しておいても良い。このとき、オペレータがパターン情報を入力する、あるいはウエハに転写すべきパターンが形成されたレチクルのバーコード又は2次元コードなどを露光装置が読み取ってパターン情報を得るようにし、露光装置又はサーバーなどにて前述したツエルニケ変化表の作成、最適露光条件（照明条件、投影光学系PLの開口数など）の決定、及び投影光学系PLの結像特性の調整などを、オペレータやサービスエンジニアを介在させることなく全て自動的に行うようにしても良い。かかる自動化にあたっては、波面収差の計測に例えば前述の計測用レチクルを用いる場合には、ウエハ上のレジスト層に転写され形成された計測用パターンの潜像の基準パターンの潜像に対する位置ずれを、例えば露光装置が備えるアライメント系によって検出することとしても良い。また、上記実施形態ではオペレータなどが波面収差計測器80をウエハステージWSTに固定するものとしたが、例えばウエハ又はウエハホルダの交換を行う搬送系（ウエハローダなど）を用いて波面収差計測器80を自動搬送しても良い。

なお、上記実施形態では、本発明がステッパに適用された場合について説明したが、これに限らず、例えば米国特許第5,473,410号等の開示されるマスクと基板とを同期移動してマスクのパターンを基板上に転写する走査型の露光装置にも適用することができる。

露光装置の用途としては半導体製造用の露光装置に限定されることなく、例えば、角型のガラスプレートに液晶表示素子パターンを転写する液晶用の露光装置や、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシン及びDNAチップなどを製造するための露光装置にも広く適用できる。また、半導体素子などのマイクロデバイスだけでなく、光露光装置、EUV露光装置、X線露光装置、及び電子線露光装置などで使用されるレチクル又はマスクを製造するために、ガラス基板又はシリコンウエハなどに回路パターンを転写する露光装置にも本発明を適用できる。

また、上記実施形態の露光装置の光源は、F₂ レーザ、ArFエキシマレーザ、KrFエキシマレーザなどの紫外パルス光源に限らず、g線（波長436nm）、i線（波長365nm）などの輝線を発する超高圧水銀ランプを用いることも可能である。

また、DFB半導体レーザ又はファイバーレーザから発振される赤外域、又は可視域の単一波長レーザ光を、例えばエルビウム（又はエルビウムとイットルビウムの両方）がドーパされたファイバーアンプで増幅し、非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換した高調波を用いても良い。また、投影光学系の倍率は縮小系のみならず等倍及び拡大系のいずれでも良い。また、投影光学系としては、屈折系に限らず、反射光学素子と屈折光学素子とを有する反射屈折系（カタディオプトリック系）あるいは反射光学素子のみを用いる反射系を用いても良い。なお、投影光学系PLとして反射屈折系又は反射系を用いるときは、前述した特定の光学素子として反射光学素子（凹面鏡や反射鏡など）の位置などを変更して投影光学系の結像特性を調整する。また、照明光ELとして、F₂ レーザ光、Ar₂ レーザ光、又はEUV光などを用いる場合には、投影光学系PLを反射光学素子のみから成るオール反射系とすることもできる。但し、Ar₂ レーザ光やEUV光などを用いる場合にはレチクルRも反射型とする。

なお、半導体デバイスは、デバイスの機能・性能設計を行うステップ、この

設計ステップに基づいたレチクルを製作するステップ、シリコン材料からウエハを製作するステップ、前述した実施形態の露光装置によりレチクルのパターンをウエハに転写するステップ、デバイス組み立てステップ(ダイシング工程、ボンディング工程、パッケージ工程を含む)、検査ステップ等を経て製造される。このデバイス製造方法によると、リソグラフィ工程で、前述した実施形態の露光装置を用いて露光が行われるので、対象パターンに応じて結像特性が調整された、あるいは波面収差の計測結果に基づいて結像特性が高精度に調整された投影光学系PLを介してレチクルRのパターンがウエハW上に転写されるので、微細パターンを重ね合せ精度良くウエハW上に転写することが可能となる。従って、最終製品であるデバイスの歩留まりが向上し、その生産性の向上が可能となる。

産業上の利用可能性

以上説明したように、本発明の結像特性計測方法は、投影光学系の目的とする結像特性を計測するのに適している。また、本発明の結像特性調整方法は、投影光学系の結像特性を調整するのに適している。また、本発明の露光方法は、微細パターンを基板上に形成するのに適している。また、本発明の露光装置は、投影光学系の結像特性を高精度に調整して露光を行うのに適している。また、本発明のプログラム及び情報記録媒体は、上記の露光装置での使用に適している。さらに、本発明のデバイス製造方法は、マイクロデバイスの製造に適している。

請 求 の 範 囲

1. 投影光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法であって、

前記投影光学系の視野内の少なくとも1つの計測点で前記投影光学系の波面収差を計測する工程と；

前記計測された波面収差と、予め用意された目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて前記目的とする結像特性を算出する工程と；を含む結像特性計測方法。

2. 請求項1に記載の結像特性計測方法であって、

前記算出する工程では、前記目的とする結像特性が、複数種類の結像特性を含む場合、前記計測された波面収差と前記複数種類の結像特性それぞれについてのツェルニケ変化表とに基づいて、前記目的とする結像特性に含まれる前記複数種類の結像特性をそれぞれ算出することを特徴とする結像特性計測方法。

3. 請求項1に記載の結像特性計測方法において、

前記計測する工程に先立って、前記投影光学系による投影の対象とするパターンの情報と、前記目的とする結像特性とに基づいてツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行うとともに、前記投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報に基づいて、前記収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する工程を更に含むことを特徴とする結像特性計測方法

4. 請求項3に記載の結像特性計測方法において、

前記投影光学系に関する情報には、前記投影光学系の開口数、照明条件、及

び照明光の波長が含まれることを特徴とする結像特性計測方法。

5. 請求項3に記載の結像特性計測方法において、

前記作成する工程では、前記目的とする結像特性が、複数種類の結像特性を含む場合、前記複数種類の結像特性それぞれについての前記収差の情報に応じたツェルニケ変化表を作成することを特徴とする結像特性計測方法。

6. 請求項1に記載の結像特性計測方法において、

前記算出された前記目的とする結像特性に関する情報を表示する工程を更に含むことを特徴とする結像特性計測方法。

7. 投影光学系の結像特性を調整する結像特性調整方法であって、

請求項1に記載の結像特性計測方法を用いて目的とする結像特性を計測する工程と；

前記結像特性の計測結果に基づいて前記投影光学系を調整する工程と；を含む結像特性調整方法。

8. 請求項7に記載の結像特性調整方法において、

前記投影光学系は、調整用の特定の光学素子を含む複数の光学素子を含んで構成され、

前記投影光学系の調整は、前記計測された結像特性と、前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を演算により決定し、その決定された目標調整量に従って前記光学素子を調整することにより行われることを特徴とする結像特性調整方法。

9. 調整用の特定の光学素子を含む複数の光学素子を含んで構成された投影光学系の結像特性を調整する結像特性調整方法であって、

前記投影光学系の視野内の少なくとも1つの計測点で前記投影光学系を介した光情報を得て、前記投影光学系の結像特性を求める工程と；

前記求めた結像特性と、前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を演算により決定する工程と；を含む結像特性調整方法

10. 請求項9に記載の結像特性調整方法において、

前記結像特性を求める工程に先立って、前記パラメータ群を求める工程を更に含むことを特徴とする結像特性調整方法。

11. 請求項9に記載の結像特性調整方法において、

前記結像特性を求める工程では、複数種類の結像特性を求め、

前記決定する工程では、前記求めた複数種類の結像特性と、前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を演算により決定することを特徴とする結像特性調整方法。

12. 請求項9に記載の結像特性調整方法において、

前記結像特性はツェルニケ多項式で表される波面収差であることを特徴とする結像特性調整方法。

13. 請求項12に記載の結像特性調整方法において、

前記関係式は、前記ツェルニケ多項式の各項の係数の内の任意の項の係数に

重み付けを行うための重み付け関数を含む式であることを特徴とする結像特性調整方法。

14. マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光方法であって、

請求項7～13のいずれか一項に記載の結像特性調整方法を用いて投影光学系の結像特性を調整する工程と；

前記結像特性が調整された投影光学系を用いて前記パターンを基板上に転写する工程と；を含む露光方法。

15. マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、

前記投影光学系を含む露光本体部に少なくともその一部が搭載可能で、前記投影光学系の波面収差を計測する計測装置と；

前記計測装置により計測された前記投影光学系の波面収差と、目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて前記目的とする結像特性を算出する第1演算装置と；を備える露光装置。

16. 請求項15に記載の露光装置において、

前記ツェルニケ変化表が予め記憶された記憶装置を更に備えることを特徴とする露光装置。

17. 請求項15に記載の露光装置において、

前記ツェルニケ変化表は、対象とするパターンを焼き付けたときの与えられた収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表であることを特徴とする露光装置。

18. 請求項15に記載の露光装置において、

前記対象とするパターンの情報、前記目的とする結像特性、前記投影光学系に関する情報、及び前記収差の情報を含む各種情報を入力するための入力装置と；

前記入力装置を介して入力された対象とするパターンの情報及び目的とする結像特性に基づいてツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行うとともに、前記入力装置を介して入力された前記投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報に基づいて、前記対象とするパターンを焼き付けたときの前記与えられた収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する第2演算装置と；を更に備えることを特徴とする露光装置。

19. 請求項18に記載の露光装置において、

前記投影光学系に関する情報には、前記投影光学系の開口数、照明条件、及び照明光の波長が含まれることを特徴とする露光装置。

20. 請求項15に記載の露光装置において、

前記第1演算装置により算出された前記目的とする結像特性に関する情報を画面上に表示する表示装置を更に備えることを特徴とする露光装置。

21. 請求項15に記載の露光装置において、

前記第1演算装置による前記目的とする結像特性の算出結果に基づいて前記投影光学系の結像特性を補正する結像特性補正装置を更に備えることを特徴とする露光装置。

22. 請求項21に記載の露光装置において、

前記投影光学系は、調整用の特定の光学素子を含む複数の光学素子を含んで構成され、

前記結像特性補正装置は、前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群が予め記憶された記憶装置と、前記算出された前記結像特性情報と前記パラメータ群と前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を算出する算出装置とを有することを特徴とする露光装置。

23. マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、

調整用の特定の光学素子を含む複数の光学素子を含んで構成された前記投影光学系と；

前記特定の光学素子の調整と前記投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群が予め記憶された記憶装置と；

前記投影光学系を含む露光本体部に少なくとも一部が搭載可能で前記投影光学系の結像特性を計測可能な計測装置と；

前記計測装置で計測された実測データと前記パラメータ群と前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を算出する演算装置と；を備える露光装置。

24. 請求項23に記載の露光装置において、

前記演算された目標調整量に応じて前記特定の光学素子を調整して前記投影光学系の結像特性を調整する結像特性調整装置を更に備えることを特徴とする露光装置。

25. 請求項23に記載の露光装置において、

前記計測装置は、前記投影光学系の複数種類の結像特性を計測可能であり、

前記演算装置は、前記計測装置で計測された前記複数種類の結像特性の実測データと前記パラメータ群と前記特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、前記特定の光学素子の目標調整量を算出することを特徴とする露光装置。

26. 請求項23に記載の露光装置において、

前記結像特性はツェルニケ多項式で表される波面収差であることを特徴とする露光装置。

27. 請求項26に記載の露光装置において、

前記関係式は、前記ツェルニケ多項式の各項の係数の内の任意の項の係数に重み付けを行うための重み付け関数を含む式であることを特徴とする露光装置。

28. リソグラフィ工程を含むデバイス製造方法であって、

前記リソグラフィ工程では、請求項15～27のいずれか一項に記載の露光装置を用いて露光を行うことを特徴とするデバイス製造方法。

29. マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置の制御用コンピュータに所定の処理を実行させるプログラムであって、

対象とするパターンの情報及び目的とする結像特性に関する情報の入力にตอบสนองしてツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行う手順と；

前記投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報の入力にตอบสนองして、前記対象とするパターンを焼き付けたときの前記与えられた収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する手順と；を前記制御用コンピュータに実行させるプログラム。

30. 請求項29に記載のプログラムにおいて、

前記投影光学系の波面収差の実測データの入力に応答して、該実測データと前記ツェルニケ変化表とに基づいて、前記投影光学系の前記目的とする結像特性を算出する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

31. 請求項30に記載のプログラムにおいて、

前記算出した前記目的とする結像特性に関する情報を表示装置に表示する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

32. 請求項30に記載のプログラムにおいて、

前記算出した前記目的とする結像特性が最適となるように前記投影光学系を調整する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

33. 請求項30に記載のプログラムにおいて、

前記投影光学系に関する異なる情報の入力及び前記与えたい収差に関する情報の入力に応答して、前記投影光学系に関する異なる情報毎に前記ツェルニケ変化表をそれぞれ作成する手順と；

前記投影光学系の波面収差の実測データの入力に応答して、該実測データと前記ツェルニケ変化表とに基づいて、前記投影光学系の前記目的とする結像特性を、前記投影光学系に関する異なる情報毎に算出する手順と；

前記算出された目的とする結像特性が最適となる前記投影光学系に関する情報を見つけることにより最適露光条件を決定する手順と；を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

34. 請求項33に記載のプログラムにおいて、

前記決定された最適露光条件を設定する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

35. 目的とする結像特性に関する情報の入力及び前記投影光学系の波面収差の実測データの入力に応答して、該実測データと予め用意された前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて前記投影光学系の目的とする結像特性を算出する手順を、前記制御用コンピュータに実行させるプログラム。

36. 請求項35に記載のプログラムにおいて、

前記算出した前記目的とする結像特性に関する情報を表示装置に表示する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

37. 請求項35に記載のプログラムにおいて、

前記算出した前記目的とする結像特性が最適となるように前記投影光学系を調整する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

38. マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置の制御用コンピュータに所定の処理を実行させるプログラムであって、

前記投影光学系の結像特性の実測データの入力に応答して、該入力された結像特性の実測データと、前記投影光学系の調整と前記投影光学系の前記結像特性の変化との関係を示すパラメータ群と、前記投影光学系の目標調整量との関係式を用いて前記投影光学系の目標調整量を算出する手順を、前記制御用コンピュータに実行させるプログラム。

39. 請求項38に記載のプログラムにおいて、

前記算出された目標調整量に関する情報を表示装置に表示する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

40. 請求項38に記載のプログラムにおいて、

前記算出された目標調整量に基づいて前記投影光学系を調整する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

41. 請求項38に記載のプログラムにおいて、

前記パラメータ群は、前記投影光学系を構成する調整用の特定の光学素子の調整と前記結像特性の変化との関係を示すパラメータ群であり、

前記目標調整量は、前記特定の光学素子を調整すべき量であることを特徴とするプログラム。

42. 請求項38に記載のプログラムにおいて、

前記結像特性はツェルニケ多項式で表される波面収差であることを特徴とするプログラム。

43. 請求項42に記載のプログラムにおいて、

前記関係式は、前記ツェルニケ多項式の各項の係数の内の任意の項の係数に重み付けを行うための重み付け関数を含む式であることを特徴とするプログラム。

44. 請求項38に記載のプログラムにおいて、

対象とするパターンの情報及び目的とする結像特性に関する情報の入力にตอบสนองしてツェルニケ変化表を作成するための条件設定を行う手順と；

前記投影光学系に関する情報及び与えたい収差に関する情報の入力に応答して前記収差の情報に応じた前記目的とする結像特性のツェルニケ変化表を作成する手順と；

前記投影光学系の波面収差の実測データの入力に応答して、該実測データと前記ツェルニケ変化表とに基づいて前記目的とする結像特性を算出する手順と；を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

4.5. 請求項4.4に記載のプログラムにおいて、

前記算出した前記目的とする結像特性に関する情報を表示装置に表示する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

4.6. 請求項4.4に記載のプログラムにおいて、

前記投影光学系の視野内の少なくとも1つの計測点で前記投影光学系を介して得られた光情報を前記投影光学系の前記波面収差の実測データに変換する手順を、前記制御用コンピュータに更に実行させることを特徴とするプログラム。

4.7. 請求項2.9～4.6のいずれか一項に記載のプログラムが記録されたコンピュータにより読み取りが可能な情報記録媒体。

4.8. マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置を製造する製造方法であって、

請求項7～1.3のいずれか一項に記載の結像特性調整方法を用いて前記投影光学系を調整する工程を含むことを特徴とする製造方法。

要 約 書

制御装置（50）では、投影光学系（PL）の波面収差の実測データが入力されると、そのデータと、その入力に先立って作成されている目的とする結像特性のツェルニケ変化表とに基づいて、投影光学系の前記目的とする結像特性を算出する。このように、ツェルニケ変化表を用いることにより、波面の計測を1度行うのみで、目的とする結像特性を算出できる。また、調整可能な特定の光学素子（13₁～13₄）の調整と投影光学系の結像特性の変化との関係を示すパラメータ群が予め求められ、そのパラメータ群が記憶装置（42）に予め記憶されている。そして、投影光学系の結像特性の実測データが入力されると、主制御装置により、その実測データと前記パラメータ群と特定の光学素子の目標調整量との関係式を用いて、特定の光学素子の目標調整量が算出される。そして、その算出結果に基づいて、特定の光学素子を調整する。

Fig. 1

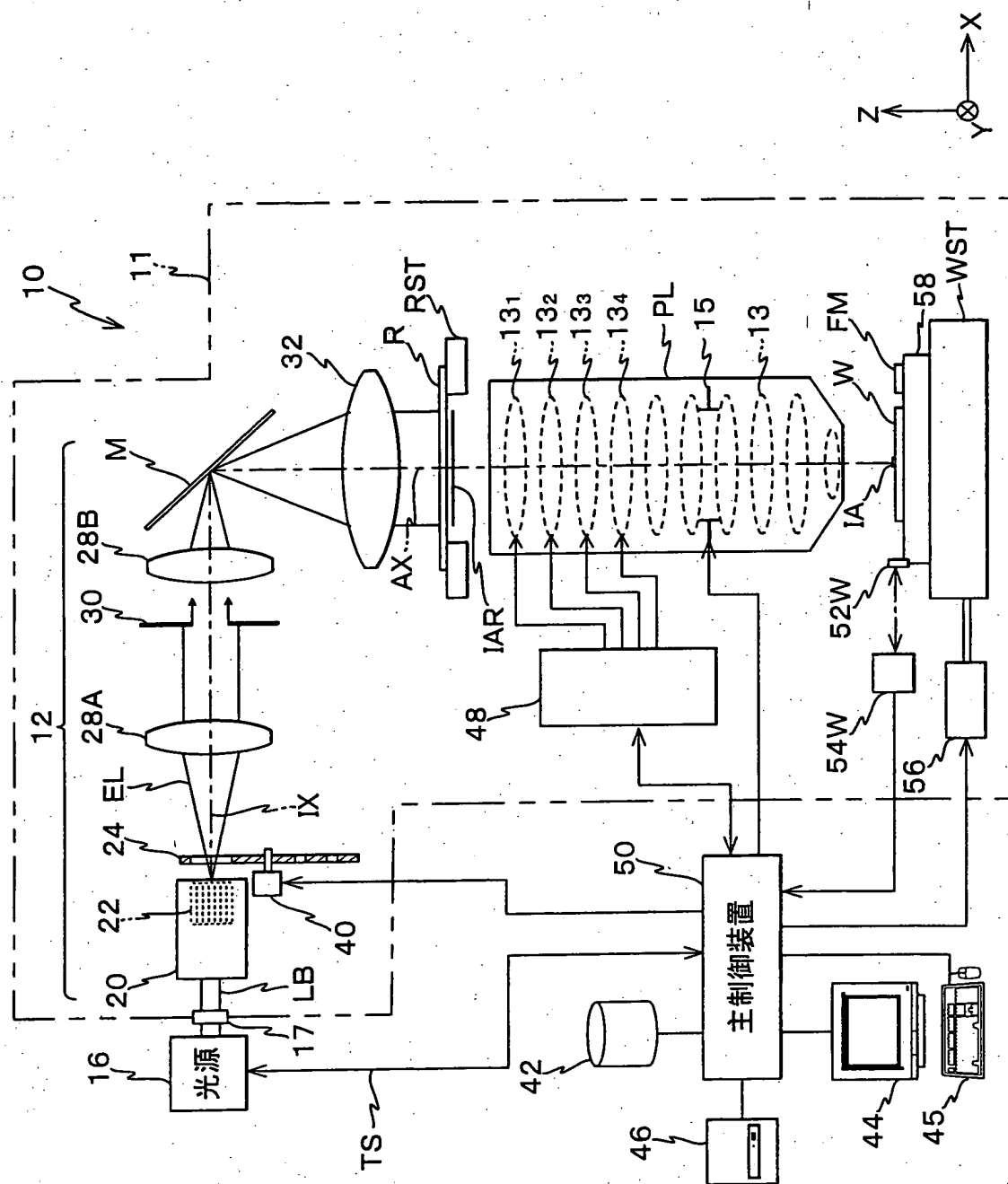


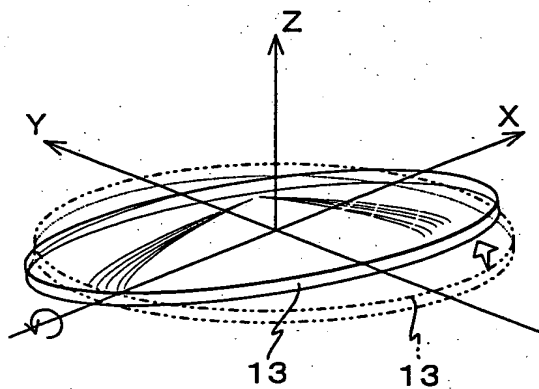
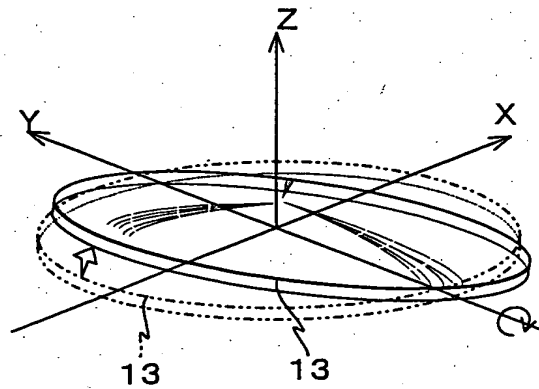
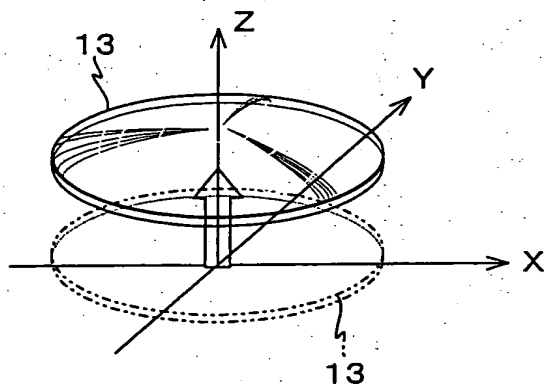
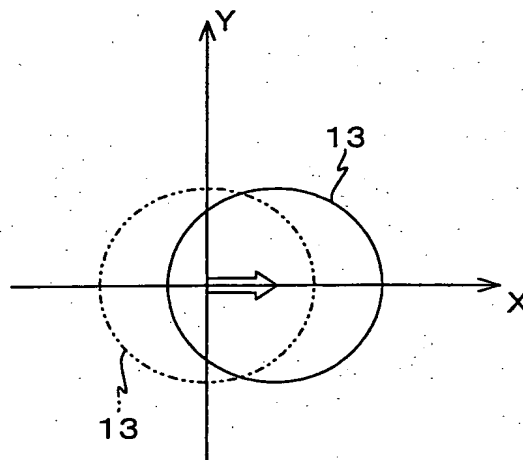
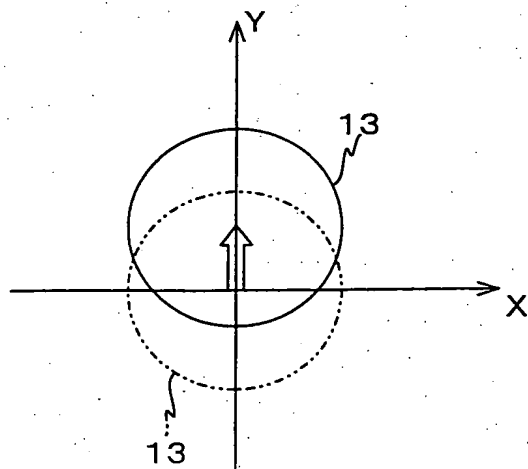
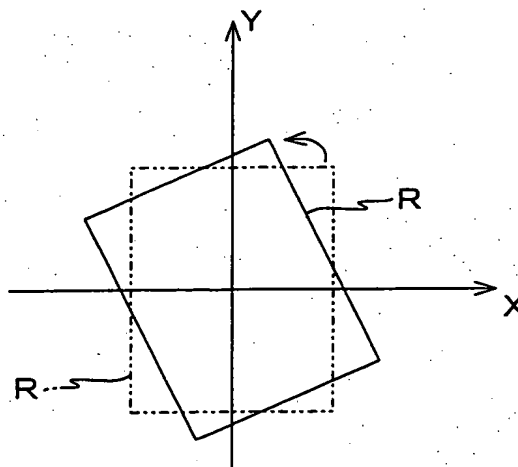
Fig. 2A*Fig. 2B**Fig. 2C**Fig. 2D**Fig. 2E**Fig. 2F*

Fig. 3

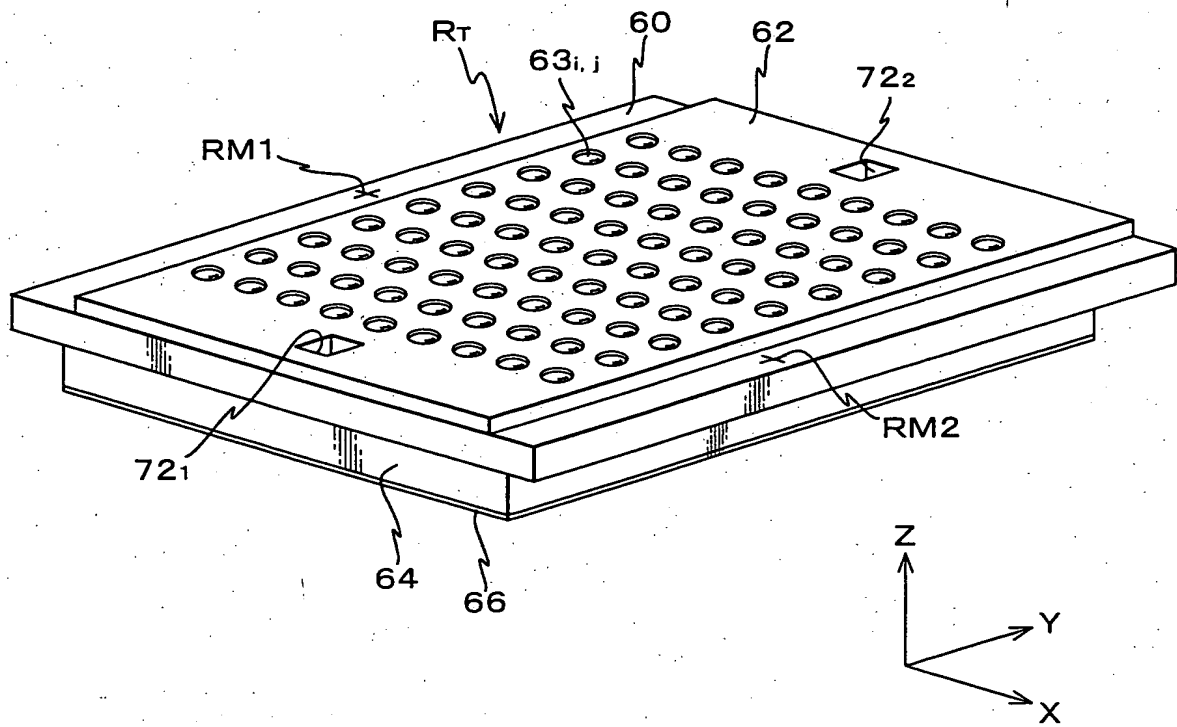
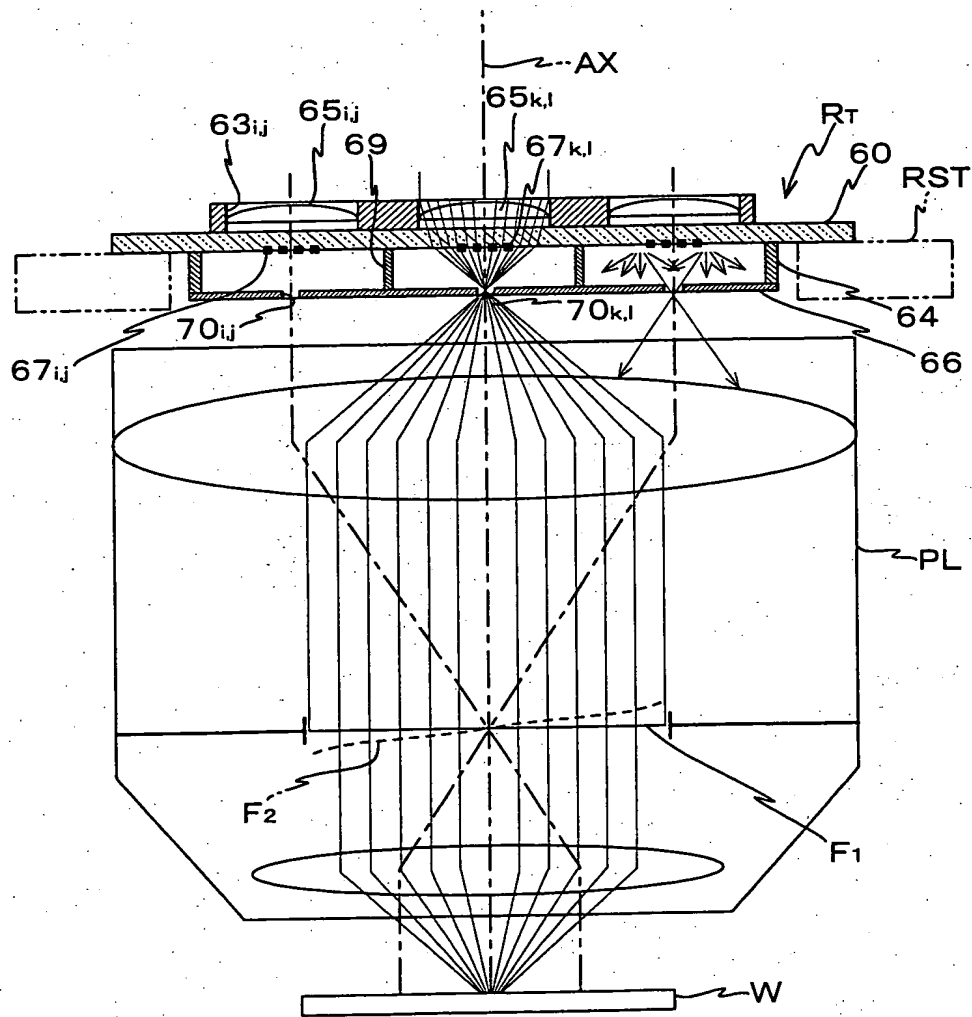
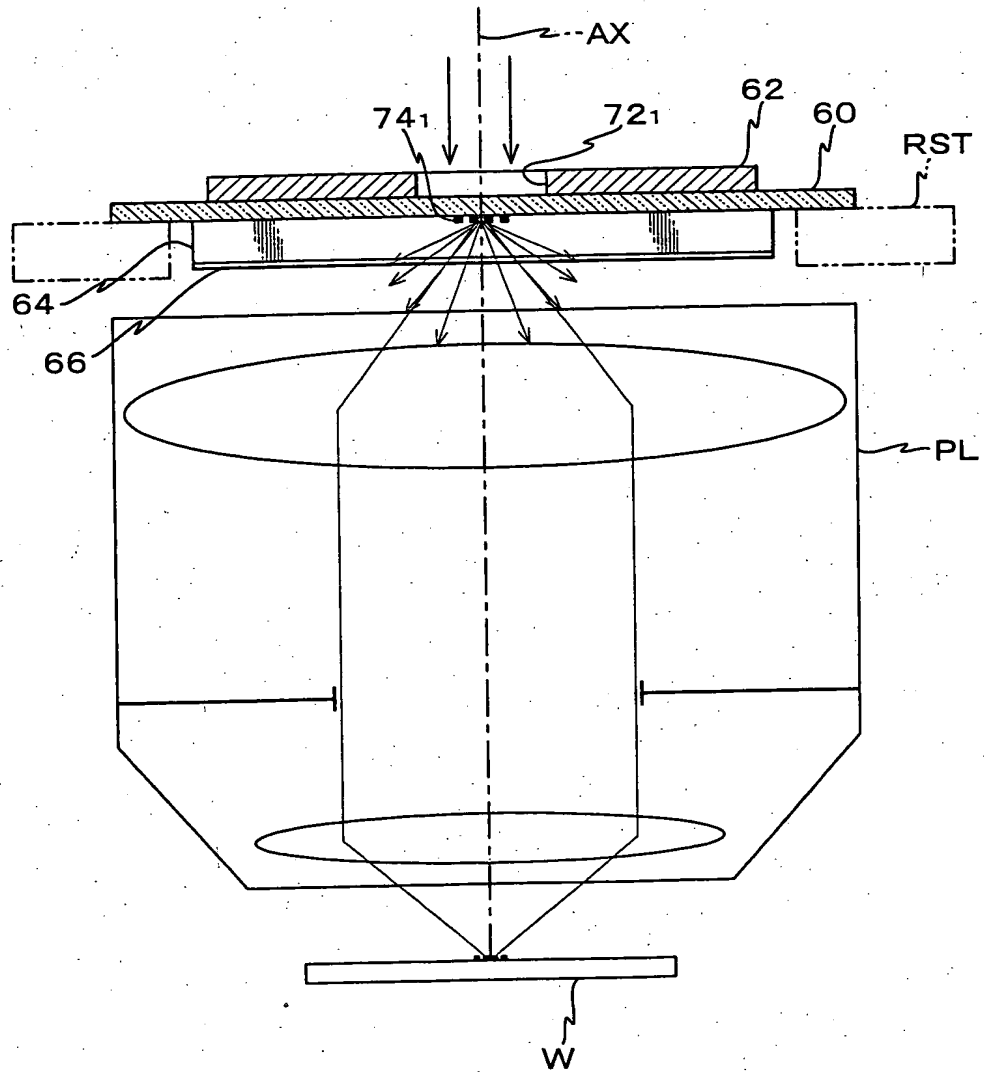


Fig. 4



5/11

Fig. 5



6 / 1 1

Fig. 6A

67*i,j*

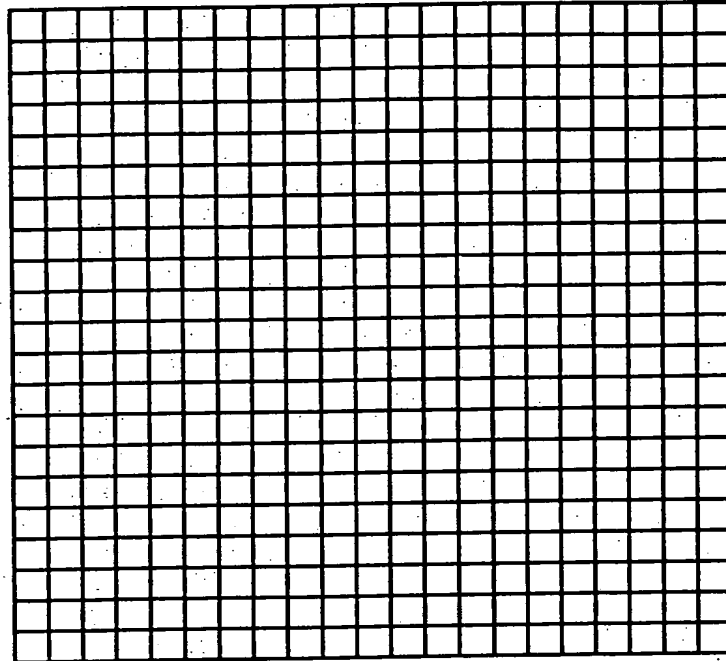


Fig. 6B

74₁(74₂)

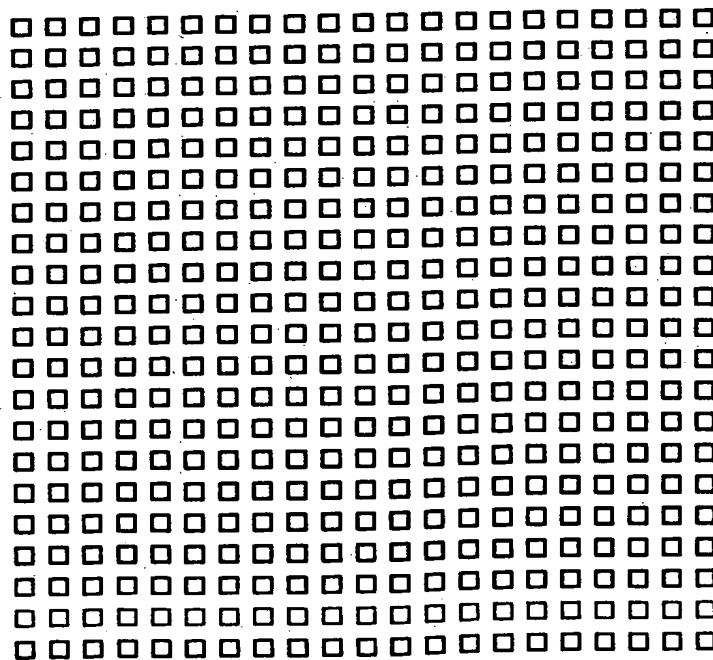


Fig. 7

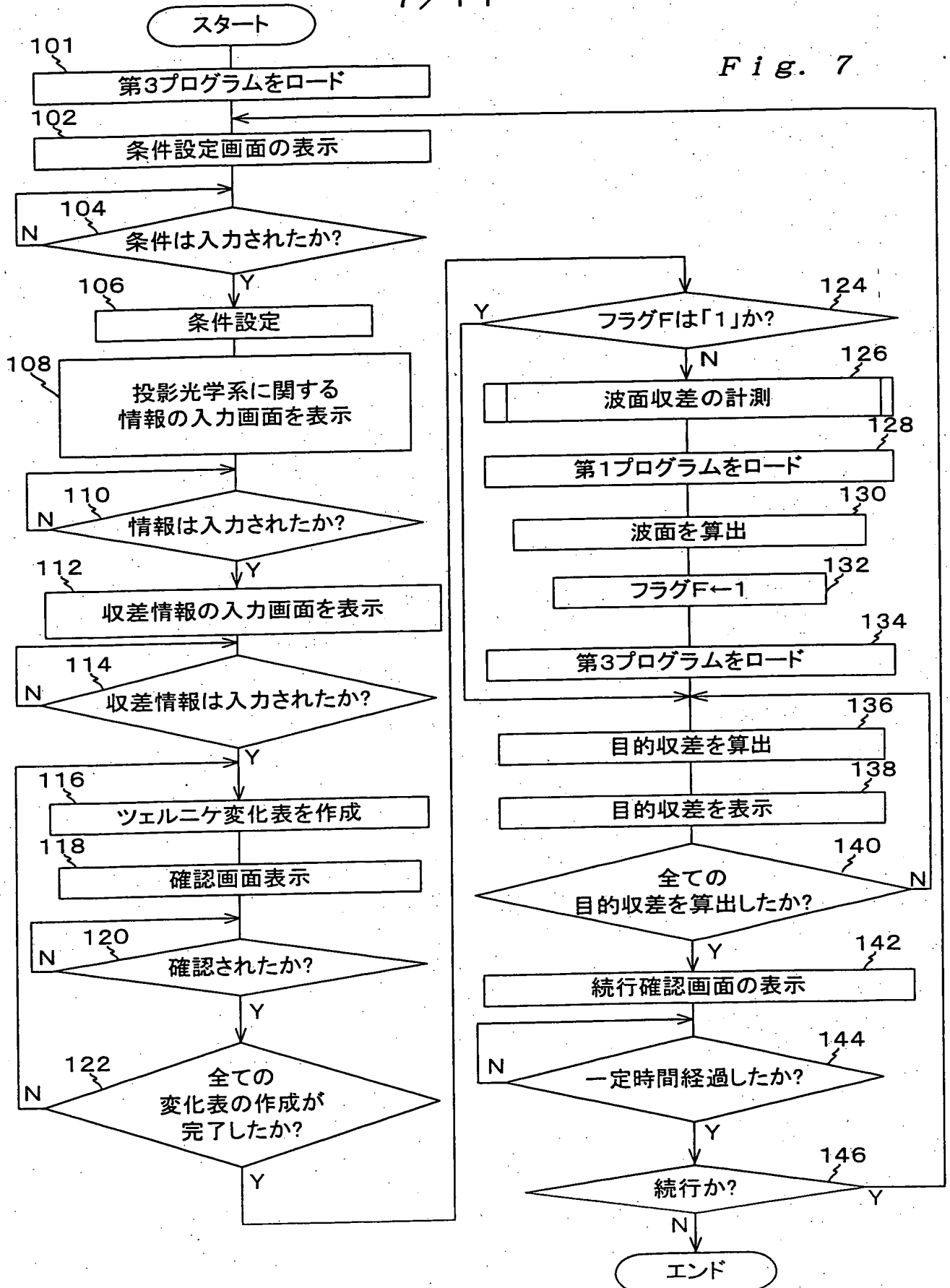


Fig. 8

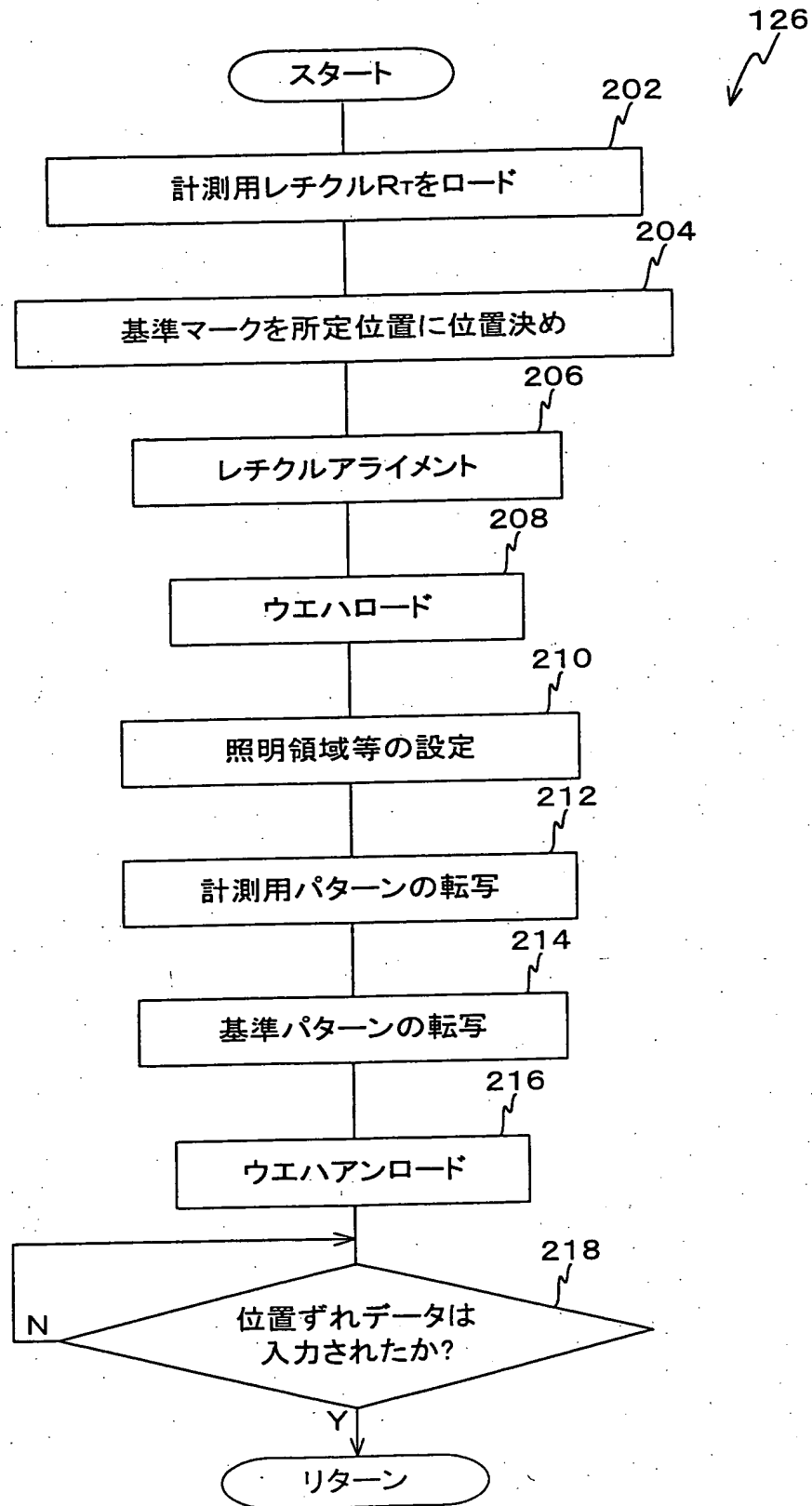


Fig. 9A

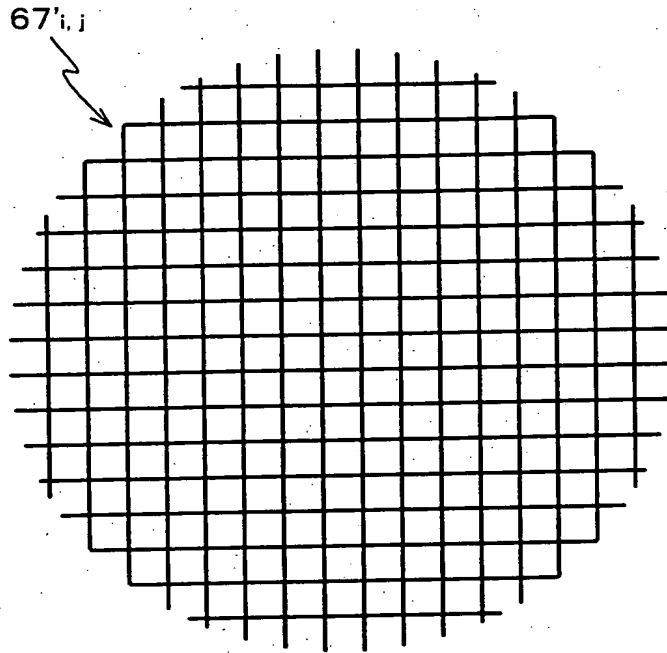


Fig. 9B

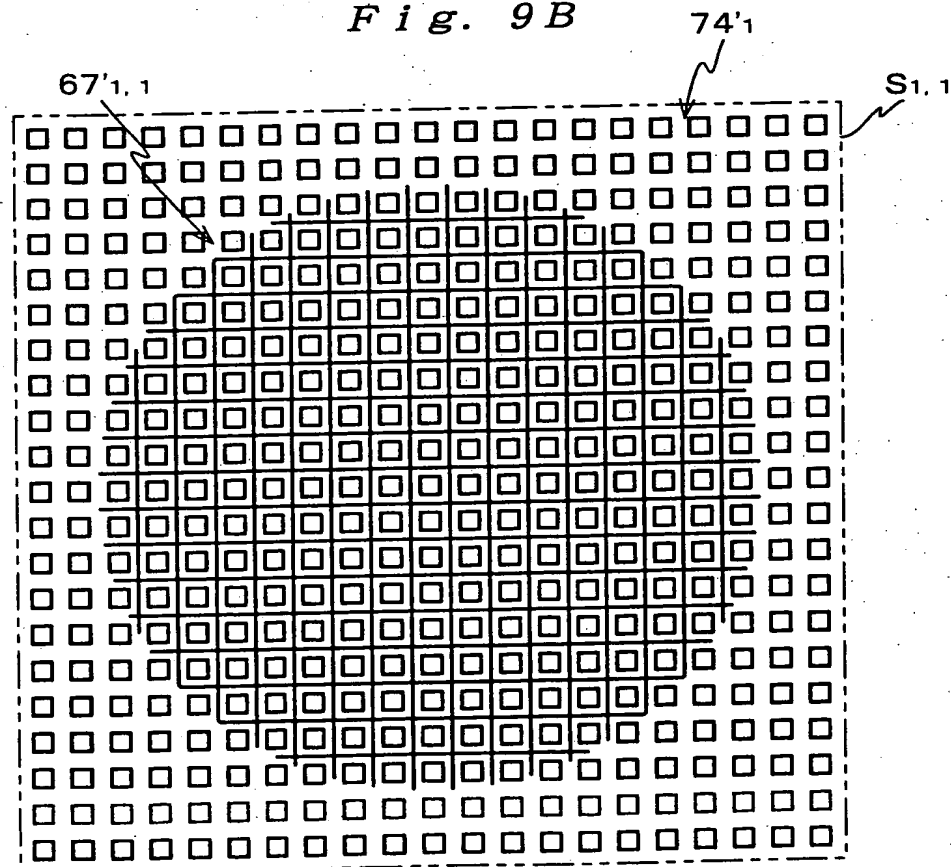


Fig. 10

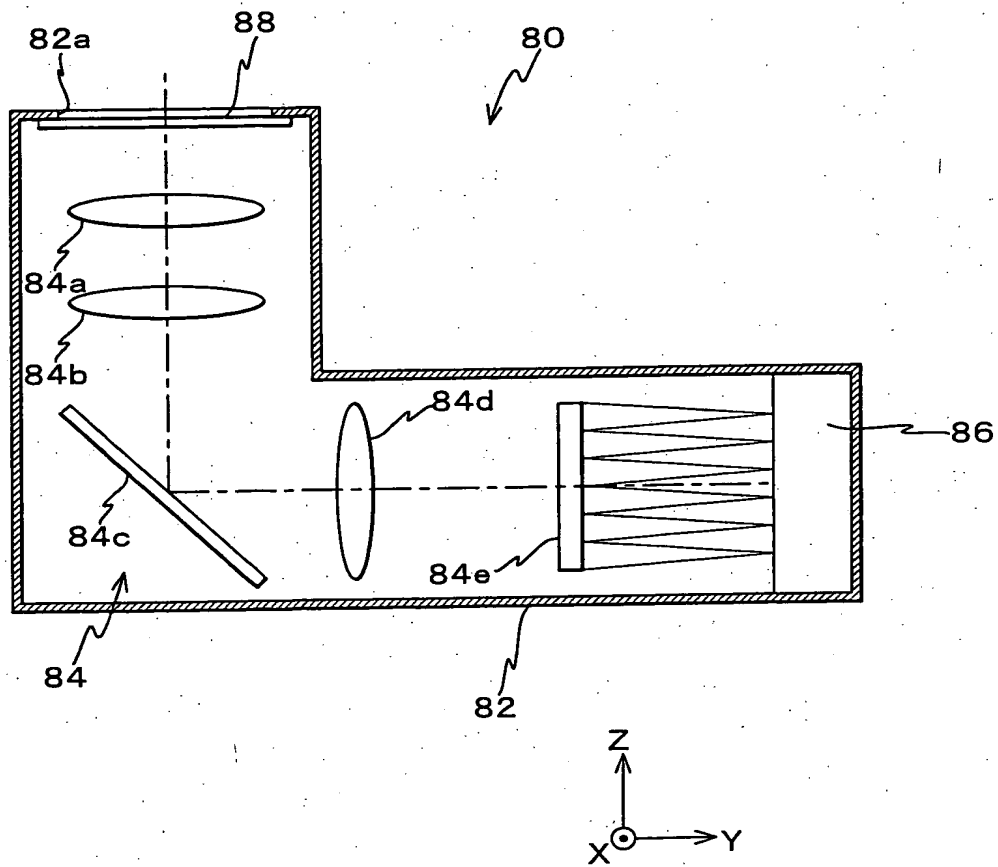


Fig. 11A

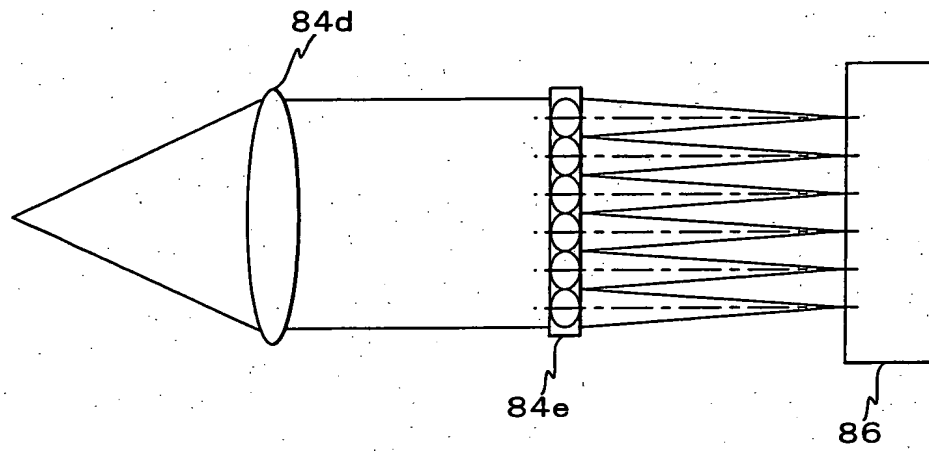
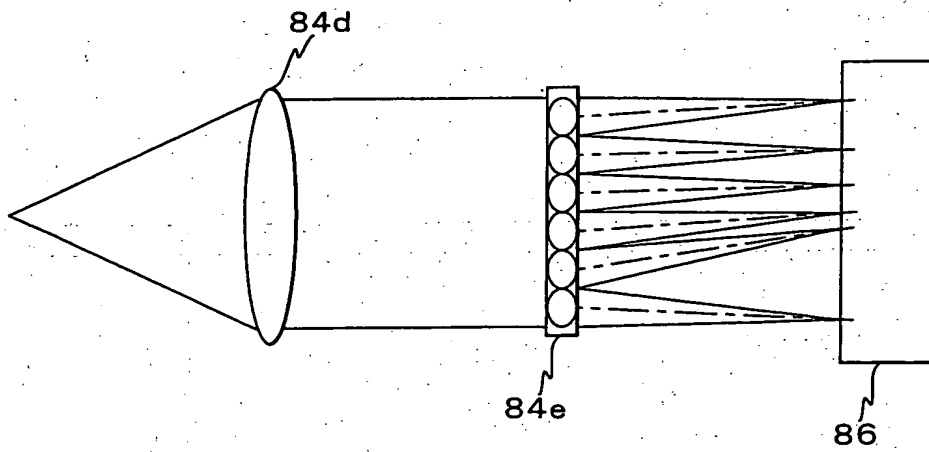


Fig. 11B



この謄本は原本と相違ないことを認証する。

平成 18 年 2 月 15 日

経済産業事務官

萬崎 茂基



Certification of Translation of
PCT Application No. PCT/JP01/11588

I, the undersigned, Yoko TAKAHASHI residing at the Front Shonan Fujisawa 704, 972-1 Fujisawa, Fujisawa-shi, Kanagawa 251-0052, JAPAN do solemnly and sincerely declare that I am well acquainted with the Japanese language and the English language and that the attached English translation of the PCT application No. PCT/JP01/11588 filed December 27, 2001 is an accurate translation to the best of my knowledge and belief from the Japanese language into the English language.

Date: March 3rd, 2006

Yoko Takahashi
Yoko TAKAHASHI



DESCRIPTION

**IMAGE FORMING CHARACTERISTICS MEASURING METHOD,
IMAGE FORMING CHARACTERISTICS ADJUSTING METHOD,
5 EXPOSURE METHOD AND APPARATUS, PROGRAM AND
STORAGE MEDIUM, AND DEVICE MANUFACTURING METHOD**

TECHNICAL FIELD

The present invention relates to image forming
10 characteristics measuring methods, image forming
characteristics adjusting methods, exposure methods and
apparatus, programs and storage mediums, and device
manufacturing methods, and more particularly to an image
forming characteristics measuring method in which a
15 targeted image forming characteristic of a projection
optical system is measured, an image forming
characteristics adjusting method in which the image
forming characteristic is adjusted, an exposure method in
which exposure is performed using a projection optical
20 system whose image forming characteristic has been
adjusted according to the image forming characteristics
adjusting method and an exposure apparatus suitable for
performing the image forming characteristics adjusting
method, a program which makes a control computer of the
25 exposure apparatus execute processes of calculating and
adjusting a targeted image forming characteristic of a
projection optical system and an information storage
medium in which such a program is stored and is readable

by the computer, and a device manufacturing method using the exposure apparatus.

BACKGROUND ART

5 Conventionally, when manufacturing devices such as semiconductors, liquid crystal displays, or the like in a photolithographic process, projection exposure apparatus have been used, such as a reduction projection exposure apparatus based on a step-and-repeat method (a so-called
10 stepper) and a scanning projection exposure apparatus based on a step-and-scan method (a so-called scanning stepper). With such projection exposure apparatus, a pattern formed on a photo-mask or reticle (generally referred to as "reticle" hereinafter) is transferred onto
15 a substrate such as a wafer or a glass plate coated with a photosensitive material such as a photo-resist, via a projection optical system.

When manufacturing semiconductor devices, because different circuit patterns need to be formed in multiple
20 layers on a substrate, it is important to accurately overlay the reticle on which a circuit pattern is formed onto the pattern formed in prior on each shot area on the substrate. In order to have good overlay accuracy, image forming characteristics of the projection optical system
25 need to be adjusted to a desired state (for example, a state where magnification error of the transferred image of a reticle pattern relative to each shot area (pattern) on the substrate is corrected). Even when transferring a

reticle pattern of a first layer onto each shot area of the substrate, the image forming characteristics of the projection optical system is preferably adjusted so that reticle patterns of a second layer and the layers onward
5 are accurately transferred onto each shot area.

As a premise for adjusting the image forming characteristics (a type of optical characteristic) of the projection optical system, the image forming characteristics need to be accurately measured (or
10 detected). As the measuring method of the image forming characteristics, a method in which the image forming characteristics are calculated (hereinafter referred to as "exposing method") is mainly used. In this method, exposure is performed using a measurement mask on which a
15 predetermined measurement pattern is formed, and a transferred image such as a resist image obtained by developing the substrate on which the projected image of the measurement pattern is transferred and formed, is measured. Then, based on the measurement results, the
20 image forming characteristics, specifically Seidel's five aberrations (distortion, spherical aberration, astigmatism, field curvature and coma) are calculated. Besides such a method, a method in which the above-mentioned five aberrations are calculated without
25 actually performing exposure (hereinafter referred to as "aerial image measurement method") is also used. In this method, a measurement mask is illuminated with an illumination light, and aerial images (projected images)

of measurement patterns formed via the projection optical system are measured, and then the above five aberrations calculated based on the measurement results.

However, with the exposing method or aerial image measurement method described above, in order to obtain all five aberrations, the measurement has to be repeated separately, using the appropriate pattern for each measurement. Furthermore, the order to perform the measurement has to be considered, depending on the type and amount of the aberration to be measured, in order to accurately adjust the projection optical system. For example, when coma is large, the image of the pattern is not resolved, therefore, when aberration such as distortion, spherical aberration, astigmatism are measured in this state, accurate data cannot be obtained. Accordingly, in such a case, the coma needs to be reduced to a certain level before measurement on distortion or the like is performed.

In addition, due to higher integration of semiconductor devices or the like in recent years, circuit patterns are becoming finer. Thus, correcting only the Seidel's five aberrations is not sufficient enough, and requirements are pressing for an overall adjustment of the image forming characteristics of the projection optical system, including the higher order of aberrations. In order to perform such overall adjustment on the image forming characteristics, lens elements that require adjustment and their adjustment amount need to be

calculated, by performing a light-ray-trace computation using data (such as curvature, refractive index, and thickness) of individual lens elements composing the projection optical system.

5 However, because data of individual lens elements are confidential for the exposure apparatus maker, it is usually difficult for a service technician repairing or adjusting the exposure apparatus or a user to obtain such data. In addition, since the light-ray-trace computation
10 requires an enormous amount of time, it is not realistic for the service technician to perform the computation on site.

 In addition, the effect of aberrations of the projection optical system on the image forming
15 characteristics of various patterns are different, which also makes a user of an exposure apparatus have different requirements depending on the type of pattern to be projected. For example, a contact-hole pattern is affected particularly by astigmatism. A line-and-space
20 pattern with a thin line-width is greatly affected by coma, and for example, best focus position is different between an isolated line pattern and a line-and-space pattern.

 Under such circumstances, new technologies are
25 expected, such as a new technology to enable an operator in a semiconductor factory to perform a simple and accurate measurement of the image forming characteristics (a type of optical characteristic) of a projection

optical system, especially the image forming characteristics (aberrations) predicted to have a great influence on the accuracy when transferring a subject pattern onto a substrate, or a new technology that can
5 enable a service technician or the like in a semiconductor factory to perform a relatively simple and highly accurate adjustment on the image forming characteristics of the projection optical system.

The present invention was made under such
10 circumstances, and has as its first purpose to provide an image forming characteristics measuring method in which a targeted image forming characteristic of a projection optical system can be measured easily and accurately.

The second purpose of the present invention is to
15 provide an image forming characteristics adjusting method in which an image forming characteristic of a projection optical system can be adjusted easily and accurately.

The third purpose of the present invention is to
20 provide an exposure method in which fine patterns can be formed with good precision on a substrate.

The fourth purpose of the present invention is to
provide an exposure apparatus that can transfer a pattern of a mask onto a substrate with good precision.

The fifth purpose of the present invention is to
25 provide a device manufacturing method that contributes to improving productivity of the devices.

The sixth purpose of the present invention is to
provide a program suitable for use in each of the

exposure apparatus, and an information storage medium where such a program is stored and is readable by a computer.

5 ***DISCLOSURE of INVENTION***

According to a first aspect of the present invention, there is provided an image forming characteristics measuring method in which at least one image forming characteristic of a projection optical
10 system is measured, the method comprising: a measuring process in which wavefront aberration of the projection optical system is measured at one measurement point at the least in a field of the projection optical system; and a calculating process in which at least one targeted
15 image forming characteristic is calculated, based on the measuring of wavefront aberration and a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic that is prepared in advance.

The "targeted image forming characteristic" in this
20 case, is a concept that includes both a targeted image forming characteristic and its index. In this description, the term "targeted image forming characteristic" is used in such meaning.

In this method, after the wavefront aberration of
25 the projection optical system is measured in at least one measurement point in the field of the projection optical system, the targeted image forming characteristic is calculated based on the measured aberration and the

Zernike sensitivity table of the image forming characteristic that is prepared in advance. By preparing the Zernike sensitivity table in advance in such manner, the targeted image forming characteristic can be
5 calculated with only one measurement of the wavefront aberration. In this case, because the measurement is performed on wavefront aberration, which is the overall image forming characteristics of the projection optical system, the targeted image forming characteristic can be
10 obtained with good accuracy.

In this case, in the calculating process, when the targeted image forming characteristic include image forming characteristics of a plurality of types, the image forming characteristics of a plurality of types
15 included in the targeted image forming characteristic can each be calculated, based on the measuring of wavefront aberration and a Zernike sensitivity table for each of the image forming characteristics of a plurality of types.

With the image forming characteristics measuring
20 method in the present invention, the Zernike sensitivity table of the image forming characteristic may be made separately for various image forming characteristics, taking into consideration various patterns, or the method may further comprise: a making process in which
25 conditions are set in order to make a Zernike sensitivity table, based on information on a pattern subject to projection by the projection optical system and the targeted image forming characteristic, and a Zernike

sensitivity table of the targeted image forming characteristic that corresponds to information related to a given aberration is made, based on information related to the projection optical system and information related to the given aberration, prior to the measuring process. In the latter case, the information related to the projection optical system can include numerical aperture of the projection optical system, illumination condition, and wavelength of illumination light.

10 With the image forming characteristics measuring method in the present invention, when the Zernike sensitivity table is made prior to the measuring process, in the making process, when the targeted image forming characteristic include image forming characteristics of a plurality of types, a Zernike sensitivity table for each of the image forming characteristics of a plurality of types that correspond to the information related to aberration can be made.

20 With the image forming characteristics measuring method in the present invention, it can further comprise: a displaying process in which information related to the targeted image forming characteristic that has been calculated is displayed.

25 According to a second aspect of the present invention, there is provided a first image forming characteristics adjusting method in which at least one image forming characteristic of a projection optical system is adjusted, the method comprising: a measuring

process in which at least one targeted image forming characteristic is measured using the image forming characteristics measuring method according to Claim 1; and an adjusting process in which the projection optical system is adjusted based on results of the measuring of the targeted image forming characteristic.

In the adjusting method, because at least one targeted image forming characteristic is measured using the image forming characteristics measuring method according to the present invention, the targeted image forming characteristic can be obtained with good accuracy. And the projection optical system is adjusted based on the image forming characteristic that is obtained (the measurement results of the image forming characteristic). Therefore, the targeted image forming characteristic of the projection optical system can be adjusted with good accuracy. For example, by making the targeted image forming characteristic an image forming characteristic (aberration) that particularly influences the image forming of a subject pattern, the image forming characteristic of the projection optical system can be adjusted as much as possible according to the subject pattern.

In this case, the projection optical system can be structured comprising a plurality of optical elements that include a specific optical element used for adjustment, and adjustment of the projection optical system can be performed by deciding a targeted adjustment

amount of the specific optical element by computation using a relation expression between the image forming characteristic that has been measured, parameters, and a targeted adjustment amount of the specific optical element, and by adjusting the specific optical element for adjustment according to the decided targeted adjustment amount, the parameters denoting a relation between adjustment of the specific optical element and a change in image forming characteristics of the projection optical system.

According to a third aspect of the present invention, there is provided a second image forming characteristics adjusting method in which at least one image forming characteristic of a projection optical system comprising a plurality of optical elements that include a specific optical element used for adjustment is adjusted, the method comprising: an obtaining process in which at least one image forming characteristic of the projection optical system is obtained, by obtaining information on light via the projection optical system at one measurement point at the least in a field of the projection optical system; and a deciding process in which a targeted adjustment amount of the specific optical element is decided by computation using a relation expression between the image forming characteristic that has been obtained, parameters, and a targeted adjustment amount of the specific optical element, the parameters denoting a relation between

adjustment of the specific optical element and a change in image forming characteristics of the projection optical system.

"A specific optical element used for adjustment" in this case, refers to a specific optical element that is used for adjusting the image forming characteristic, and besides the case when the image forming characteristic of the projection optical system is adjusted by driving or changing the specific optical element, the case such as when the image forming characteristic is adjusted by reprocessing or exchanging the specific optical element is also included. That is, besides adjustment (correction) of the image forming characteristic at the adjustment stage, "adjustment" with the specific optical element also includes the making of the projection optical system itself whose image forming characteristic is adjusted. In addition, as a matter of course, the specific optical element for adjustment is not limited to one, and may be in plurals. In this description, the term "A specific optical element used for adjustment" is used in such a meaning.

In addition, when the specific optical element for adjustment is in plurals, the "targeted adjustment amount" includes the case when the adjustment amount is zero, that is, the case when no adjustment is made. In this description, the term "targeted adjustment amount" is used in such a meaning.

In this method, when adjusting the projection

optical system, information on light via the projection optical system is obtained at one measurement point in the least in the field of the projection optical system, and the image forming characteristic is obtained. And, by performing computation, using a relation expression between the image forming characteristic that has been obtained, parameters denoting the relation between the adjustment of the specific optical element and the change in the image forming characteristics of the projection optical system, and the targeted adjustment amount of the specific optical element, with the targeted adjustment amount as an unknown value, the unknown value, that is, the targeted adjustment amount of the specific optical element is decided by computation. In this manner, by using the relation expression between the actual measurement results of the image forming characteristic (aberration), parameters denoting the relation between the adjustment of the specific optical element and the change in the image forming characteristics of the projection optical system, and the targeted adjustment amount of the specific optical element, the targeted adjustment amount of the specific optical element for correcting the image forming characteristic can be calculated easily. This makes it possible to adjust the image forming characteristic of the projection optical system in a simple manner with high precision.

In this case, the method may further comprise an obtaining process in which the parameters are obtained,

prior to the obtaining process in which the image forming characteristic is obtained.

With the second image forming characteristics adjusting method in the present invention, the image forming characteristic subject to adjustment may be only one image forming characteristic, or the image forming characteristic may include a plurality of types of image forming characteristics. In the latter case, in the obtaining process in which the image forming characteristic is obtained, image forming characteristics of a plurality of types can be obtained, and in the deciding process, a target adjustment amount of the specific optical element can be decided by computation using a relation expression between the image forming characteristics of a plurality of types that have been obtained, parameters, and a targeted adjustment amount of the specific optical element, the parameters denoting a relation between adjustment of the specific optical element and a change in image forming characteristics of the projection optical system.

With the second image forming characteristics measuring method in the present invention, the image forming characteristic subject to adjustment can be image forming characteristics of various types, and corresponding to such image forming characteristics various relation expressions can be considered. For example, the image forming characteristic can be a wavefront aberration expressed in a Zernike polynomial.

In this case, the relation expression can be an equation that includes a weighting function that performs weighting on a coefficient of any term in coefficients of each term of the Zernike polynomial.

5 According to a fourth aspect of the present invention, there is provided an exposure method in which a pattern formed on a mask is transferred onto a substrate via a projection optical system, the exposure method comprising: an adjusting process in which at least
10 one image forming characteristic of the projection optical system is adjusted using the image forming characteristics adjusting method according to any one of the first and second image forming characteristics adjusting methods; and a transferring process in which
15 the pattern is transferred onto the substrate using the projection optical system whose image forming characteristic is adjusted.

 In the method, the image forming characteristic of the projection optical system is adjusted using either
20 the first or the second image forming characteristics adjusting method of the present invention, and the pattern of the mask is transferred onto the substrate via the projection optical system whose image forming characteristic is adjusted. Therefore, because the
25 pattern of the mask is transferred onto the substrate via the projection optical system whose image forming characteristic is adjusted with high precision, it allows fine patterns to be formed on the substrate with good

precision.

Especially when the projection optical system is adjusted using the first image forming characteristics adjusting method of the present invention, the targeted
5 image forming characteristic, for example, the image forming characteristic (aberration) that particularly influences the image forming of the subject pattern, is adjusted as much as possible. Accordingly, even when exposure is performed using a mask on which a fine
10 pattern is formed as the subject pattern, the pattern is transferred on the substrate via a projection system whose image forming characteristic (aberration) that particularly influences the image forming of the fine pattern is adjusted as much as possible.

15 According to a fifth aspect of the present invention, there is provided a first exposure apparatus that transfers a pattern formed on a mask onto a substrate via a projection optical system, the exposure apparatus comprising: a measuring unit that measures
20 wavefront aberration of the projection optical system, the measuring unit being at least partly attachable to an exposure apparatus main body including the projection optical system; and a first computing unit that calculates at least one targeted image forming
25 characteristic based on wavefront aberration of the projection optical system measured by the measuring unit and a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic.

In this apparatus, when the measuring unit measures the wavefront aberration of the projection optical system, the first computing unit calculates the targeted image forming characteristic based on the calculated wavefront aberration of the projection optical system and the Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic. In this manner, by using the Zernike sensitivity table, the targeted image forming characteristic can be calculated with only one measurement of the wavefront aberration. In this case, because the measurement is performed on wavefront aberration, which is the overall image forming characteristics of the projection optical system, the targeted image forming characteristic can be obtained with good accuracy. And, by performing exposure in a state where the targeted image forming characteristic obtained with good accuracy becomes optimum (for example, the difference between the target value is minimal), the mask pattern can be transferred onto the substrate with good accuracy.

In this case, the first exposure apparatus can further comprise a storage unit that stores the Zernike sensitivity table in advance.

With the first exposure apparatus according to the present invention, the Zernike sensitivity table can be a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic that corresponds to information on a given aberration on exposure of a subject pattern.

The first exposure apparatus according to the present invention can further comprise: an input unit used to input information of various types including information on the subject pattern, information on the targeted image forming characteristic, information related to the projection optical system, and information on the given aberration; and a second computing unit that set conditions in order to make a Zernike sensitivity table based on the information on the subject pattern and the targeted image forming characteristic input via the input unit, and based on information related to the projection optical system and information related to the given aberration input via the input unit, the second computing unit makes a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic that corresponds to information on the given aberration on exposure of the subject pattern.

In this case, the information related to the projection optical system can include numerical aperture of the projection optical system, illumination condition, and wavelength of illumination light.

The first exposure apparatus according to the present invention can further comprise a display unit which displays information on the targeted image forming characteristic calculated by the first computing unit on screen.

The first exposure apparatus according to the present invention can further comprise an image forming

characteristics correcting unit that corrects at least one image forming characteristic of the projection optical system based on calculation results of the targeted image forming characteristic by the first
5 computing unit.

In this case, the projection optical system can be structured comprising a plurality of optical elements that include a specific optical element used for adjustment, and the image forming characteristics
10 correcting unit can have a storage unit in which parameters are stored in advance that denotes a relation between adjustment of the specific optical element and a change in image forming characteristics of the projection optical system, and a calculation unit that calculates a
15 targeted adjustment amount of the specific optical element using a relation expression between information on the image forming characteristic that has been calculated, the parameters, and a targeted adjustment amount of the specific optical element.

20 According to a sixth aspect of the present invention, there is provided a second exposure apparatus that transfers a pattern formed on a mask onto a substrate via a projection optical system, the exposure apparatus comprising: the projection optical system that
25 comprises a plurality of optical elements including a specific optical element used for adjustment; a storage unit in which parameters are stored in advance that denotes a relation between adjustment of the specific

optical element and a change in image forming characteristics of the projection optical system, a measuring unit that measures at least one image forming characteristic of the projection optical system, the
5 measuring unit being at least partly attachable to an exposure apparatus main body including the projection optical system; and a computing unit that calculates a targeted adjustment amount of the specific optical element using a relation expression between an actual
10 measurement data measured by the measuring unit, the parameters, and a targeted adjustment amount of the specific optical element.

In this apparatus, parameters are obtained in advance that denote the relation between the adjustment
15 of an adjustable specific optical element and the change in image forming characteristics of the projection optical system, and are stored in the storage unit. And, when the measuring unit actually measures the image forming characteristic of the projection optical system,
20 the computing unit then calculates the targeted adjustment amount of the specific optical element using the relation expression between the actual measurement data of the image forming characteristic, the above parameters, and the targeted adjustment amount of the
25 specific optical element. As is described, because the above parameters are obtained in advance and stored in the storage unit, when the image forming characteristic (aberration) is actually measured the targeted adjustment

amount of the specific optical element for correcting the image forming characteristic can be calculated easily, and by adjusting the specific optical element based on the calculation results, the image forming characteristic of the projection optical system can be adjusted simply but with high precision. Accordingly, by performing exposure using such projection optical system whose image forming characteristic is adjusted with high precision, the pattern of the mask can be transferred onto the substrate with good accuracy via the projection optical system.

In this case, the adjustment based on the above calculated targeted adjustment amount of the specific optical element can be performed manually via an operator, or, for example, the second exposure apparatus can further comprise an image forming characteristics adjusting unit that adjusts at least one image forming characteristic of the projection optical system by adjusting the specific optical element according to the calculated targeted adjustment amount.

With the second exposure apparatus according to the present invention, the image forming characteristic subject to adjustment can be one image forming characteristic, however, the image forming characteristic can include image forming characteristics of a plurality of types. In the latter case, the measuring unit can measure image forming characteristics of a plurality of types of the projection optical system, and the computing

unit can calculate a targeted adjustment amount of the specific optical element using a relation expression between an actual measurement data of the image forming characteristics of a plurality of types measured by the measuring unit, the parameters, and a targeted adjustment amount of the specific optical element.

With the second exposure apparatus according to the present invention, the image forming characteristic subject to adjustment can be image forming characteristics of various types, and corresponding to such image forming characteristics various relation expressions can be considered. For example, the image forming characteristic can be a wavefront aberration expressed in a Zernike polynomial.

In this case, the relation expression can be an equation that includes a weighting function that performs weighting on a coefficient of any term in coefficients of each term of the Zernike polynomial.

According to a seventh aspect of the present invention, there is provided a first program that makes a control computer of an exposure apparatus that transfers a pattern of a mask onto a substrate via a projection optical system execute a predetermined process, the program making the control computer execute: a condition setting procedure in which conditions are set for making a Zernike sensitivity table in response to an input of information related to information on a subject pattern and information on a targeted image forming

characteristic; and a making procedure in which a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic corresponding to information on given aberration on exposure of the subject pattern is made, in response to an input of information related to the projection optical system and information on the given aberration.

When the program is installed in the control computer of the exposure apparatus, by inputting information on the subject pattern and information related to the targeted image forming characteristic in the computer, condition setting for making a Zernike sensitivity table is performed by the computer in response to the input. Next, by inputting information related to the projection optical system and information on a given aberration into the computer that has completed such condition setting, the computer makes a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic that corresponds to the information on the given aberration on exposure of the subject pattern in response to the input. That is, by only inputting minimal information necessary for making the Zernike sensitivity table into the computer, such as information on the subject pattern, information related to the targeted image forming characteristic, information related to the projection optical system, and information on the given aberration, a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic that corresponds to the

given aberration on exposure of a subject pattern can be easily made. The Zernike sensitivity table, which is made, can also be used in other exposure apparatus that comprises the same type of projection optical system.

5 After creating the Zernike sensitivity table in the manner described above, the program can further make the control computer execute a calculating procedure in which the targeted image forming characteristic of the projection optical system is calculated in response to an
10 input of actual measurement data of wavefront aberration of the projection optical system, based on the actual measurement data and the Zernike sensitivity table. In such a case, by further inputting the actual measurement data of wavefront aberration of the projection optical
15 system, the computer calculates the targeted image forming characteristic of the projection optical system based on the actual data and the Zernike sensitivity table in response to the input. Accordingly, only by inputting the actual measurement data of the wavefront
20 aberration obtained in at least one measurement, the targeted image forming characteristic can be calculated by the computer accurately in a short period of time.

 With the first program according to the present invention, the program can further make the control
25 computer execute a displaying procedure in which information on the targeted image forming characteristic that has been calculated is displayed on a display unit.

 With the first program according to the present

invention, the program can further make the control computer execute an adjusting procedure in which the projection optical system is adjusted so that the targeted image forming characteristic that has been
5 calculated becomes optimal (for example, the difference between the target value is minimal).

With the first program according to the present invention, when the targeted image forming characteristic is calculated in addition to the making of the Zernike
10 sensitivity table described above, the program can further make the control computer execute: a making procedure in which the Zernike sensitivity table is made in response to input of different information related to the projection optical system and input of information on
15 the given aberration, by each different information related to the projection optical system; a calculating procedure in which the targeted image forming characteristic of the projection optical system is calculated by each different information related to the
20 projection optical system in response to input of actual measurement data of wavefront aberration of the projection optical system, based on the actual measurement data and the Zernike sensitivity table; and a deciding procedure in which an optimum exposure condition
25 is decided by finding information related to the projection optical system that makes the targeted image forming characteristic that has been calculated become optimal (for example, the difference between the target

value is minimal).

In this case, the program can further make the control computer execute a setting procedure in which the optimum exposure condition that has been decided is set.

5 According to an eighth aspect of the present invention, there is provided a second program that makes a control computer execute a process, the program making the control computer execute: a procedure of calculating a targeted image forming characteristic of a projection
10 optical system in response to an input of information related to the targeted image forming characteristic and an input of actual measurement data of wavefront aberration of the projection optical system, based on the actual measurement data and a Zernike sensitivity table
15 of the targeted image forming characteristic that is prepared in advance.

When the program is installed in the control computer of the exposure apparatus, by inputting information related to the targeted image forming
20 characteristic and the actual measurement data of wavefront aberration of the projection optical system into the computer, the computer calculates the targeted image forming characteristic of the projection optical system based on the actual measurement data and the
25 Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic prepared in advance in response to the input. In such a case, control computers of other exposure apparatus that comprise the same type of

projection optical system can use the Zernike sensitivity table, which is a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic that is made using the first program of the present invention. Accordingly, only by inputting information related to the targeted image forming characteristic and the actual measurement data of the wavefront aberration obtained in at least one measurement, the targeted image forming characteristic can be calculated by the computer accurately in a short period of time. In this case, for example, the image forming characteristic that greatly affects the image forming of the subject pattern is preferably chosen as the targeted image forming characteristic.

With the second program according to the present invention, the program can further make the control computer execute a displaying procedure in which information on the targeted image forming characteristic that has been calculated is displayed on a display unit.

With the second program according to the present invention, the program can further make the control computer execute an adjusting procedure in which the projection optical system is adjusted so that the targeted image forming characteristic that has been calculated becomes optimal.

According to a ninth aspect of the present invention, there is provided a third program that makes a control computer of an exposure apparatus that transfers a pattern of a mask onto a substrate via a projection

optical system execute a predetermined process, the program making the control computer execute: a calculating procedure in which a targeted adjustment amount of the projection optical system is calculated in response to an input of actual measurement data of image forming characteristic of the projection optical system, using a relation expression between the actual measurement data of image forming characteristic that has been input, parameters, and a targeted adjustment amount of the projection optical system, the parameters denoting a relation between adjustment of the projection optical system and a change in image forming characteristics of the projection optical system.

With this program, the program is installed in the control computer of the exposure apparatus in advance. And, when the actual measurement data of the image forming characteristic of the projection optical system is input, the control computer of the exposure apparatus calculates the targeted adjustment amount using the relation expression between the actual measurement data that has been input, the parameters denoting the relation between the adjustment of the projection optical system and the change in the image forming characteristics of the projection optical system, and the targeted adjustment amount of the projection optical system. That is, the operator or the like only has to actually measure the image forming characteristic (aberration) and input the actual measurement values of the image forming

characteristic, to calculate the targeted adjustment amount of the projection optical system in order to correct the image forming characteristic. Accordingly, for example, by adjusting the projection optical system
5 based on the calculated targeted adjustment amount, the image forming characteristic of the projection optical system can be easily adjusted, with high precision.

In this case, the program can further make the control computer execute a displaying procedure in which
10 information on the targeted adjustment amount that has been calculated is displayed on a display unit.

With the third program according to the present invention, the program can further make the control computer execute an adjusting procedure in which the
15 projection optical system is adjusted based on the target adjustment amount that has been calculated.

With the third program according to the present invention, the parameters can be parameters denoting a relation between adjustment of a specific optical element
20 used for adjustment that structures the projection optical system and a change in the image forming characteristics, and the targeted adjustment amount can be an amount of the specific optical element that needs to be adjusted.

25 With the third program according to the present invention, the image forming characteristic can be a wavefront aberration expressed in a Zernike polynomial.

In this case, the relation expression can be an

equation that includes a weighting function that performs weighting on a coefficient of any term in coefficients of each term of the Zernike polynomial.

With the third program according to the present invention, the program can further make the control computer execute: a condition setting procedure in which conditions are set for making a Zernike sensitivity table in response to an input of information related to information on a subject pattern and an input of information on a targeted image forming characteristic; a making procedure in which a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic corresponding to information on aberration is made, in response to an input of information related to the projection optical system and information on a given aberration; and a calculating procedure in which the targeted image forming characteristic is calculated in response to an input of actual measurement data of wavefront aberration of the projection optical system, based on the measurement data and the Zernike sensitivity table.

With the third program according to the present invention, the program can further make the control computer execute a displaying procedure in which information on the targeted image forming characteristic that has been calculated is displayed on a display unit.

With the third program according to the present invention, the program can further make the control computer execute a converting procedure in which

information obtained on light via the projection optical system at one measurement point at the least in a field of the projection optical system is converted into actual measurement data of the wavefront aberration of the
5 projection optical system.

The first, second, and third programs of the present invention can be stored in a storage medium. Therefore, according to a tenth aspect of the present invention, there is provided an information storage
10 medium that can be read by a computer in which any one of the first, second, and third programs is recorded.

In addition, in a lithographic process, by performing exposure using one of the first and second exposure apparatus according to the present invention,
15 patterns can be formed with good precision on a substrate, which allows production of highly integrated microdevices with good yield. Accordingly, further from another aspect of the present invention, there is provided a device manufacturing method that uses one of the first and
20 second exposure apparatus of the present invention (that is, a device manufacturing method that includes the process of transferring a pattern onto a photosensitive object using one of the first and second exposure apparatus).

25 In addition, when making the exposure apparatus, by adjusting the projection optical system using one of the first and second image forming characteristics adjusting method after the projection optical system has been

incorporated into the main body of the exposure apparatus, the image forming characteristics of the projection optical system can be adjusted with good accuracy. Accordingly, yet further from another aspect of the present invention, there is provided a making method of an exposure apparatus that includes the process of adjusting the projection optical system using one of the first and second image forming characteristics adjusting methods.

10

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Fig. 1 is a schematic view showing a configuration of an exposure apparatus according to an embodiment of the present invention;

15

Figs. 2A to 2F are views for explaining a definition of drive directions of movable lenses or the like that are driven on the making of a data base;

Fig. 3 is a schematic perspective view of a measurement reticle;

20

Fig. 4 is a view showing a schematic view of an XZ cross section in the vicinity of an optical axis in a state where a measurement reticle is mounted on a reticle stage, along with a diagram of a projection optical system;

25

Fig. 5 is a view showing a schematic view of an XZ cross section in the vicinity of a -Y side end portion in a state where a measurement reticle is mounted on a reticle stage, along with a diagram of a projection

optical system;

Figs. 6A and 6B are views showing a measurement pattern and a reference pattern formed on the measurement reticle in this embodiment, respectively;

5 Fig. 7 is a flow chart schematically showing a control algorithm of a CPU of a main controller for measurement of an image forming characteristic and display (simulation);

10 Fig. 8 is a flow chart showing a processing in subroutine 126 of Fig. 7;

 Fig. 9A is a view showing a reduced image (latent image) of the measurement pattern formed at a predetermined spacing on the resist layer of a wafer, and Fig. 9B is a view showing a positional relation between
15 the latent image of the measurement pattern in Fig. 9A and a latent image of a reference pattern;

 Fig. 10 is a sectional view showing an example of a portable wavefront-aberration measuring unit; and

 Figs. 11A and 11B are views showing beams outgoing
20 from a microlens array, in cases where there is no aberration in the optical system and where there is aberration in the optical system, respectively.

Best Mode for Carrying out the Invention

25 An embodiment of the present invention will be described below with reference to Figs. 1 to 9B.

 Fig. 1 shows an entire structure of an exposure apparatus 10 according to an embodiment of the present

invention. Exposure apparatus 10 is a reduction projection exposure apparatus based on a step-and-repeat method, or a so-called stepper, which uses a pulse-laser light source as an exposure light source (hereinafter, called a "light source").

Exposure apparatus 10 comprises: an illumination system made up of a light source 16 and an illumination optical system 12; a reticle stage RST which serves as a mask stage holding a reticle R serving as a mask, which is illuminated with exposure illumination light EL serving as an energy beam from the illumination system; a projection optical system PL which projects exposure illumination light EL emitted from reticle R onto a wafer W (on the image plane) serving as a substrate; a wafer stage WST serving as a substrate stage on which a Z-tilt stage 58 for holding wafer W is mounted; and a control system for controlling the above parts.

Light source 16 is a pulse-ultraviolet light source that emits pulse light having a wavelength in the vacuum-ultraviolet range, such as an F₂ laser (a wavelength of 157nm) or an ArF laser (a wavelength of 193nm). Alternatively, light source 16 may be a light source that emits pulse light having a wavelength in the far-ultraviolet or ultraviolet range such as a KrF excimer laser (a wavelength of 248nm).

In actual, light source 16 is arranged in a service room that has a low degree of cleanliness, different from a clean room where a chamber 11 is arranged. In chamber

11, an exposure apparatus main body is housed that is made up of parts such as various elements of illumination optical system 12, reticle stage RST, projection optical system PL, and wafer stage WST, and light source 16 is
5 connected to chamber 11 via a light-transmitting optical system (not shown). The light transmitting optical system includes at least an optical axis adjusting optical system called a beam-matching unit as a part of its system. An internal controller of the apparatus controls
10 the on/off of the output of laser beam LB, the energy of laser beam LB per pulse, oscillation frequency (repetition frequency), the center wavelength and half band width in spectrum (width of the wavelength range) and the like of light source 16, according to control
15 information TS from a main controller 50.

Illumination optical system 12 comprises: a beam-shaping illuminance uniformity optical system 20 which includes parts such as a cylinder lens, a beam expander (none are shown), an optical integrator (homogenizer) 22;
20 an illumination system aperture stop plate 24; a first relay lens 28A; a second relay lens 28B; a reticle blind 30; a mirror M for deflecting the optical path; a condenser lens 32, and the like. As the optical integrator a fly-eye lens, a rod integrator (internal
25 reflection type integrator) or a diffracting optical element can be used. In this embodiment, since a fly-eye lens is used as optical integrator 22, it will be referred to as fly-eye lens 22 hereinafter.

Beam shaping illuminance uniformity optical system 20 is connected to the light transmitting optical system (not shown), via a light transmission window 17 provided on the chamber 11. It shapes the cross section of laser beam LB, which is emitted from light source 16 and enters beam shaping illuminance uniformity optical system 20 via light transmission window 17, using parts such as the cylinder lens and beam expander. Fly-eye lens 22 in the exit side of beam shaping illuminance uniformity optical system 20 forms a surface light source (a secondary light source), which is made up of a large number of point light sources on the focal plane on the exit side arranged so that it substantially coincides with the pupil plane of illumination optical system 12, with the laser beam that has its cross section shaped, in order to illuminate reticle R with uniform illuminance distribution. The laser beam emitted from the secondary light source is hereinafter referred to as "illumination light EL".

In the vicinity of the focal plane on the exit side of fly-eye lens 22, illumination system aperture stop plate 24 constituted by a disk-like member is disposed. And, on illumination system aperture stop plate 24, for example, an aperture stop (conventional stop) constituted by a circular opening, an aperture stop (a small σ stop) for making coherence factor σ small which is constituted by a small, circular opening, a ring-like aperture stop (annular stop) for forming a ring of illumination light,

and a modified aperture stop for modified illumination composed of a plurality of openings disposed in an eccentric arrangement are arranged at a substantially equal angle (only two types of aperture stops are shown in Fig. 1). Illumination system aperture stop plate 24 is constructed and arranged to be rotated by a driving unit 40, for example a motor, controlled by main controller 50, and one of the aperture stops is selectively set to be on the optical path of the illumination light EL, so that the shape of the illuminant surface in Koehler illumination described later is limited to a ring, a small circle, a large circle, four eyes or the like.

Instead of, or in combination with aperture stop plate 24, for example, an optical unit comprising at least one of a plurality of diffracting optical elements, a movable prism (conical prism, polyhedron prism, etc.) which moves along the optical axis of the illumination optical system, and a zoom optical system can be arranged in between light source 16 and optical integrator 22. And by changing the intensity distribution of the illumination light on the incident surface when the optical integrator 22 is a fly-eye lens, or the range of incident angle of the illumination light to the incident surface when the optical integrator 22 is an internal surface reflection type integrator, light amount distribution (the size and shape of the secondary illuminant) of the illumination light on the pupil plane of the illumination optical system, or in other words,

the loss of light due to the change of conditions for illuminating reticle R, is preferably suppressed. In addition, in the embodiment, a plurality of light source images (virtual images) formed by the internal surface reflection type integrator is also referred to as the secondary light source.

On the optical path of illumination light EL emitted from illumination system aperture stop plate 24, a relay optical system is arranged that is made up of the first relay lens 28A and the second relay lens 28B, with reticle blind 30 disposed in between. Reticle blind 30 is disposed on a plane conjugate to the pattern surface of reticle R, and forms a rectangular opening to set a rectangular illumination area IAR on reticle R. In this case, a movable blind that has a variable opening shape is used as reticle blind 30, and the opening is set by main controller 50 based on blind setting information, which is also called masking information.

On the optical path of the illumination light EL after the second relay lens 28B making up the relay optical system, deflecting mirror M is disposed for reflecting illumination light EL having passed through the second relay lens 28B toward reticle R. And, on the optical path of illumination light EL after mirror M, condenser lens 32 is disposed.

In the structure described above, the incident surface of fly-eye lens 22, the plane on which the reticle blind 30 is disposed, and the pattern surface of

reticle R are set optically conjugate to one another, whereas the light source surface formed on the focal plane on the exit side of fly-eye lens 22 (the pupil plane of the illumination optical system) and the Fourier transform plane of projection optical system PL (the exit pupil plane) are set optically conjugate to each other, so as to form a Koehler illumination system.

The operation of illumination optical system 12 that has the structure described above will be briefly described below. Laser beam LB emitted in pulse from light source 16 enters beam shaping illuminance uniformity optical system 20, which shapes the cross section of the beam. The beam then enters fly-eye lens 22, and the secondary light source is formed on the focal plane on the exit side of fly-eye lens 22.

When illumination light EL emitted from the secondary light source passes through one of the aperture stops on illumination system aperture stop plate 24, it then passes through the rectangular aperture of the reticle blind 30 via the first relay lens 28A, and then passes through second relay lens 28B and is deflected vertically downward by mirror M. Then, after passing through condenser lens 32, illumination light EL illuminates the rectangular illumination area IAR on reticle R held on reticle stage RST with uniform illuminance.

On reticle stage RST, reticle R is mounted and held by electrostatic chucking (or by vacuum chucking) or the

like (not shown). Reticle stage RST is structured so that it can be finely driven (and rotated) on a horizontal plane (an XY plane) by a driving system (not shown). In addition, reticle stage RST can be moved in the Y-axis
5 direction within a predetermined stroke range (of around the length of reticle R). The position of reticle stage RST is measured by a position detector, such as a reticle laser interferometer, at a resolution of, for example, 0.5 to 1nm, and the measurement results are supplied to
10 main controller 50.

Material used for reticle R depends on the light source used. More particularly, when an ArF excimer laser or KrF excimer laser is used as the light source, synthetic quartz, fluoride crystal such as fluorite,
15 fluorine-doped quartz or the like can be used, whereas, when an F₂ laser is used as the light source, the material used for reticle R needs to be fluoride crystal such as fluorite, fluorine-doped quartz or the like.

Projection optical system PL is, for example, a
20 reducing system that is double telecentric, and the projection magnification of projection optical system PL is, e.g., 1/4, 1/5 or 1/6. Therefore, when illumination area IAR on reticle R is illuminated with illumination light EL in the manner described above, the image of the
25 pattern formed on reticle R is reduced by the above projection magnification via projection optical system PL, and then is projected and transferred onto a rectangular area IA (normally coincides with the shot area) on wafer

W coated with a resist (photosensitive material).

Projection optical system PL is a dioptric system composed only of a plurality of refracting optical elements (lenses) 13, such as around 10 to 20, as is shown in Fig. 2. Of the plurality of lenses 13 making up projection optical system PL, a plurality of lenses 13₁, 13₂, 13₃, 13₄ (in this case, for the sake of simplicity, there are four lens devices) in the object-plane side (reticle R side) are movable lenses, which can be driven externally by an image forming characteristics correction controller 48. Lens holders (not shown) hold lenses 13₁, 13₂, 13₄, respectively, and these lens holders are supported in the gravitational direction at three points by driving devices such as piezo elements (not shown). And, by independently adjusting the applied voltage to the driving devices, the lenses 13₁, 13₂, 13₄ can be shifted in a Z-axis direction, which is the optical axis direction of projection optical system PL, and can be driven (tilted) in a direction of inclination relative to the XY plane (that is, a rotational direction around the X-axis and a rotational direction around the Y-axis). In addition, a lens holder (not shown) holds lens 13₃, and on the periphery of the lens holder, driving devices such as piezo elements are disposed at a substantially equal angle of, for example, 90 degrees. The opposing driving devices are paired, and the applied voltage to each pair is adjusted so that lens 13₃ can be shifted two-dimensionally in the XY plane. In this embodiment, lenses

13₁, 13₂, 13₃, and 13₄ each structure a specific optical element for adjustment. Specific optical elements are not limited to lenses 13₁, 13₂, 13₃, 13₄, and may include lenses disposed near the pupil plane or the image plane of projection optical system PL, or an aberration correcting plate (optical plate) for correcting the aberration of projection optical system PL, especially the non-rotational symmetric component. Furthermore, the degree of freedom (the number of movable directions) of the specific optical elements is not limited to two or three, but may be one or four and over.

In addition, an aperture stop 15 is provided near the pupil plane of projection optical system PL, and the numerical aperture (N.A.) of aperture stop 15 is variable continuously in a predetermined range. As aperture stop 15, for example, a so-called iris aperture stop is used, and main controller 50 controls aperture stop 15.

When an ArF excimer laser or KrF excimer laser is used as the illumination light EL, the material for each of the lens elements used in the projection optical system PL can be synthetic quartz, however, when an F₂ laser is used, the material of the lenses used all has to be fluoride crystal such as fluorite, or fluorine-doped quartz referred to earlier.

Wafer stage WST is structured freely drivable on the XY two-dimensional plane by a wafer-stage driving portion 56. And wafer W is held on a Z-tilt stage 58 mounted on wafer stage WST by electrostatic chucking,

vacuum chucking or the like, via a wafer holder (not shown). Z-tilt stage 58 adjusts the position of wafer W in the Z-direction (focus position) and the angle of inclination of wafer W with respect to the XY plane. In addition, the X- and Y-positions and rotation (including yawing, pitching and rolling) of wafer stage WST is measured with a wafer laser interferometer 54W externally disposed via a movable mirror 52W, which is fixed on Z-tilt stage 58. The measurement values of wafer laser interferometer 54W are supplied to main controller 50.

In addition, a reference mark plate FM on which reference marks such as those for base-line measurement are formed is fixed on Z-tilt stage 58 so that the surface of reference mark plate FM is substantially the same height as the surface of wafer W.

In the exposure apparatus 10 in the embodiment, although it is omitted in the drawings, a pair of reticle alignment microscopes is provided above reticle R, each constituted by a TTR (Through The Reticle) alignment optical system. With this system, the exposure wavelength is used to observe a reticle mark 2 on reticle R and a reference mark on the reference mark plate at the same time, via projection optical system PL. As such reticle alignment microscopes, microscopes that have a similar structure to the ones disclosed in, for example, Japanese Patent Application Laid-Open No. 07-176468 and the corresponding U.S. Patent No. 5,646,413, are used. As long as the national laws in designated states or elected

states, to which this international application is applied, permit, the above disclosures are incorporated herein by reference.

In addition, in the embodiment, although it is
5 omitted in the drawings, the position of wafer W in the Z-direction is measured with a focus detection sensor constituted by a multiple focal point position detection system, which details are disclosed in, for example, Japanese Patent Application Laid-Open No. 06-283403 and
10 its corresponding U.S. Patent No. 5,448,332. The output of this focus sensor is supplied to main controller 50, which performs so-called focus-leveling by controlling Z-tilt stage 58. As long as the national laws in designated states or elected states, to which this international
15 application is applied, permit, the above disclosures are incorporated herein by reference.

Furthermore, an alignment system based on an off-axis method is provided (not shown) on the side surface of projection optical system PL. As such a system, for
20 example, a microscope of an FIA (Field Image Alignment) system based on an image-processing method is used. In this system, for example, a broadband detection beam that does not expose the resist on the wafer is irradiated on a target mark, an image of the target mark formed on the
25 photodetection surface by the reflection light from the target mark and an index image are picked up with a pick-up device (such as a CCD), and the imaging signals are output. And, based on the output of the alignment system,

the position of the reference marks on reference mark plate FM and alignment marks on the wafer can be measured in the XY two-dimensional directions.

In the control system in Fig. 1, main controller 50 plays the main role. Main controller 50 is made up of a so-called workstation (or microcomputer) comprising a CPU (Central Processing Unit), ROM (Read Only Memory), RAM (Random Access Memory), or the like, and controls overall operations such as the stepping of wafer stage WST in between shots and the exposure timing so that exposure operations are appropriately performed.

In addition, in the embodiment, for example, a storage unit 42 made up of hard disks, an input unit 45 comprising a key board and a pointing-device such as a mouse, a display unit 44 such as a CRT display or liquid-crystal display, and a drive unit 46 which is an information recording medium such as CD-ROM, DVD-ROM, MO, or FD are externally connected to main controller 50. In the information recording medium (hereinafter described as CD-ROM for the sake of convenience) set in drive unit 46, a conversion program (a first program), a second program, a third program, and data associated with the second program are stored. In this case, the first program is a conversion program for converting positional deviations measured using a measurement reticle R_T , which will be described later, into coefficients of each term of the Zernike polynomial, the second program is a program for computing the adjustment amount of the image

forming characteristic based on the obtained coefficients of each term of the Zernike polynomial, and the third program is a program for converting the obtained coefficients of each term of the Zernike polynomial into various image forming characteristics (including index values of the image forming characteristics).

Next, the above database will be described. The database contains numerical data of parameters for calculating an image forming characteristic, in this case, a targeted drive amount (targeted adjustment amount) of movable lenses 13_1 , 13_2 , 13_3 , and 13_4 referred to earlier, so that the image forming characteristic is adjusted according to the input of measurement results of the wavefront aberration. The database consists of a group of data on a variation amount of the image forming characteristic, which are obtained as simulation results, arranged in a predetermined order. The simulation performed uses a model substantially equivalent to projection optical system PL, and obtains data on how the image forming characteristic corresponding to a plurality of measurement points within the field of projection optical system PL change when movable lenses 13_1 , 13_2 , 13_3 , and 13_4 are driven by a unit adjustment quantity in directions of each degree of freedom (movable directions), or more specifically, obtains wavefront data, that is, data on how the coefficients of the second term through the 37th term of the Zernike polynomial change.

Next, the procedure of generating the database will

be briefly described. First of all, design values of projection optical system PL (numerical aperture N.A., coherence factor σ , wavelength, data of each lenses or the like) are input into a computer used for the
 5 simulation where specific optical software is installed. Then, data on a first measurement point (in this case, a position corresponding to an arbitrary pinhole position of measurement reticle R_T , which will be described later) within the field of projection optical system PL are
 10 input in the simulation computer.

Next, data on unit quantity of the movable lenses in directions of each degree of freedom (movable directions) is input. However, before the input, conditions that are a prerequisite for the input will be
 15 described below.

More particularly, for movable lenses 13_1 , 13_2 , and 13_4 , directions in which each of the movable lenses 13 are rotated around the X-axis and Y-axis are to be the positive directions of a Y-direction tilt and an X-
 20 direction tilt, as is shown by the arrows in Figs. 2A and 2B, and the unit tilt amount is to be 0.1 degrees. In addition, when each of the movable lenses 13 are shifted in the +Z direction as is shown in Fig. 2C, the +Z direction is to be the positive direction of the Z-
 25 direction shift, and the unit shift amount is to be 100 μm .

In addition, for movable lens 13_3 , when it is shifted in the +X direction as is shown in Figs. 2D and

2E, this direction is to be the + (positive) direction of the X-direction shift, whereas when it is shifted in the +Y direction, this direction is to be the + (positive) direction of the Y-direction shift, and the unit shift
5 amount is to be 100 μm .

And, for example, when instructions to tilt movable lens 13₁ in the positive direction of the Y-direction tilt by the unit quantity is input, the simulation computer calculates the amount of deviation of a first wavefront
10 from an ideal wavefront at a first measurement point set in advance within the field of projection optical system PL; for example, variation of the coefficients of each term (e.g. the second term through the 37th term) of the Zernike polynomial. The data of the variation is shown on
15 the display, while also being stored in memory as parameter PARA1P1.

Next, when instructions to tilt movable lens 13₁ in the positive direction of the X-direction tilt by the unit quantity is input, the simulation computer
20 calculates the amount of deviation of a second wavefront from the ideal wavefront at the first measurement point, for example, variation of the coefficients of the above terms of the Zernike polynomial, and data on the variation are shown on the display, while also being
25 stored in memory as parameter PARA2P1.

Next, when instructions to shift movable lens 13₁ in the positive direction of the Z-direction shift by the unit quantity is input, the simulation computer

calculates the deviation of a third wavefront from the ideal wavefront at the first measurement point, for example, variation of the coefficients of the above terms of the Zernike polynomial, and data on the variation are shown on the display, while also being stored in memory as parameter PARA3P1.

Then, input for each measurement point from the second measurement point to the n^{th} measurement point is performed in the same procedure as is described above, and each time instructions are input for the Y-direction tilt, the X-direction tilt, and the Z-direction shift of movable lens 13₁, the simulation computer calculates the data of the first, second, and third wavefront in each measurement point, such as variation of the coefficients of the above terms of the Zernike polynomial, and data on each variation are shown on the display, while also being stored in memory as parameters PARA1P2, PARA2P2, PARA3P2, through PARA1Pn, PARA2Pn, PARA3Pn.

Also for the other movable lenses 13₂, 13₃, and 13₄, in the same procedure as is described above, input for each measurement point is performed and instructions are input for driving movable lenses 13₂, 13₃, and 13₄ in the + direction only by the unit quantity in directions of each degree of freedom. And in response, the simulation computer calculates the wavefront data for each of the first through n^{th} measurement points when movable lenses 13₂, 13₃, and 13₄ are driven only by the unit quantity in directions of each degree of freedom, such as variation

of the coefficients of the above terms of the Zernike polynomial, and parameter (PARA4P1, PARA5P1, PARA6P1, ... PARAMP1), parameter (PARA4P2, PARA5P2, PARA6P2, ... PARAMP2), up to parameter (PARA4Pn, PARA5Pn, PARA6Pn, ... PARAMPn) are stored in memory. Then, data of a matrix O given the following expression (1) is stored in the CD-ROM as the above database. The data of matrix O is composed of column matrices (vectors) PARA1P1 up to PARAMPn, which consists of variations of the coefficients of the above terms of the Zernike polynomial. In the embodiment, because there are three movable lenses that can be moved in directions of three degrees of freedom and one movable lens that can be moved in directions of two degrees of freedom, $m = 3 \times 3 + 2 \times 1 = 11$.

$$O = \begin{bmatrix} \text{PARA1P1} & \text{PARA2P1} & \dots & \dots & \text{PARAMP1} \\ \text{PARA1P2} & \text{PARA2P2} & \dots & \dots & \text{PARAMP2} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \text{PARA1Pn} & \text{PARA2Pn} & \dots & \dots & \text{PARAMPn} \end{bmatrix} \dots(1)$$

Next, the method of measuring and displaying (simulating) the image forming characteristic will be described so that an operator of exposure apparatus can easily understand the state of aberrations of projection optical system PL. The simulation in the embodiment requires the actual measurement data of the wavefront aberration of projection optical system PL, and when the wavefront aberration is measured, a measurement reticle R_T (hereinafter, also called "reticle R_T " as

appropriate) is used. Therefore, first of all, measurement reticle R_T will be described.

Fig. 3 shows a schematic oblique view of measurement reticle R_T . In addition, Fig. 4 shows a
 5 schematic view of reticle R_T mounted on the reticle stage RST sectioned along a X-Z plane in the vicinity of optical axis AX, along with a diagram of projection optical system PL. Also, Fig. 5 shows a schematic view of reticle R_T mounted on the reticle stage RST sectioned
 10 along a X-Z plane in the vicinity of the -Y side end, along with a diagram of projection optical system PL.

As is obvious in Fig. 3, the shape of measurement reticle R_T is almost the same as an ordinary reticle with a pellicle. Measurement reticle R_T comprises a glass
 15 substrate 60, a lens-attached member 62 which has a rectangular plate-like shape and is fixed on the upper surface of glass substrate 60 in Fig. 3 at the center in the X-axis direction, a spacer member 64 made up of a frame member that has the same shape as an ordinary
 20 pellicle frame, being fixed on the bottom surface of the glass substrate 60 in Fig. 3, and an aperture plate 66 fixed on the bottom surface of spacer member 64.

In the lens-attached member 62, n circular apertures $63_{i,j}$ ($i=1$ through p , $j=1$ through q , $p \times q = n$)
 25 are formed in a matrix arrangement, covering the entire surface excluding both ends in the Y-direction. Inside the circular apertures $63_{i,j}$, condenser lenses $65_{i,j}$ are provided that are each made of a convex lens having an

optical axis in the Z-axis direction (refer to Fig. 4).

In addition, inside the space enclosed by glass substrate 60, spacer member 64, and aperture plate 66, reinforcing members 69 are provided as is shown in Fig. 4, spaced a predetermined distance apart.

Furthermore, on the lower surface of the glass substrate 60, facing condenser lenses $65_{i,j}$, measurement patterns $67_{i,j}$ are formed as is shown in Fig. 4. In addition, in aperture plate 66, pinhole-shaped openings $70_{i,j}$ are formed, each facing measurement patterns $67_{i,j}$ as is shown in Fig. 4. The diameter of pinhole-shaped openings $70_{i,j}$ is, for example, around 100 to 150 μm .

Referring back to Fig. 3, in lens-attached member 62, openings 72_1 , 72_2 are formed, respectively, in the center of strip shaped areas on both ends of lens-attached member 62 in the Y-axis direction. As is shown in Fig. 5, on the bottom surface (pattern surface) of glass substrate 60, a reference pattern 74_1 is formed opposing opening 72_1 . Also, although it is omitted in the drawing, a reference pattern 74_2 identical to reference pattern 74_1 is formed opposing the other opening 72_2 on the bottom surface (pattern surface) of glass substrate 60.

Moreover, as is shown in Fig. 3, on the X-axis that passes through the center of reticle R, a pair of reticle alignment marks RM1 and RM2 is formed symmetrically with respect to the center of the reticle, on the glass substrate 60 outside lens-attached member 62.

In the embodiment, as measurement patterns $67_{i,j}$, a mesh (street-line shaped) pattern is used, as is shown in Fig. 6A. And, corresponding to the pattern, reference patterns 74_1 and 74_2 are a two-dimensional grid pattern that has square patterns arranged at the same pitch as measurement pattern $67_{i,j}$ in Fig. 6B. As reference patterns 74_1 and 74_2 , the pattern shown in Fig. 6A can be used, and the pattern shown in Fig. 6B can be used as the measurement pattern. Furthermore, patterns that have other shapes may be used as the measurement pattern $67_{i,j}$, and in such a case, as the corresponding reference pattern, a pattern having a predetermined positional relation with the measurement pattern has to be used. That is, the reference pattern only needs to be a pattern, which is a reference for positional deviation of the measurement pattern, regardless of the shape. However, in order to measure the image forming characteristic of projection optical system PL, a pattern that covers the entire image field of projection optical system PL or the entire exposure area is preferred.

Next, the method of measuring and displaying (simulating) image forming characteristics will be described so that an operator of exposure apparatus 10 can easily understand the state of aberrations of projection optical system PL, following a flow chart in Fig. 7, which schematically shows the control algorithm of the CPU in main controller 50, and referring to other figures when necessary.

As a premise, the CD-ROM containing the first through third programs and the database is set in drive unit 46, and from the CD-ROM, the first through third programs are to be installed in storage unit 42.

5 The process in the flow chart starts when the operator inputs the instructions to start the simulation via the input unit 45.

First, in step 101, the third program is loaded into the main memory. Then, steps 102 through 122 are
10 executed, according to the third program.

First, in step 102, when the screen for setting conditions is displayed on the display unit 44, the process then goes to step 104 and waits for the conditions to be input. The operator then inputs
15 information on a pattern subject to simulation (for example, in the case of a line-and-space pattern, the pitch, the line width, and duty ratio or the like) and information on a targeted image forming characteristic (including an index value of the image forming
20 characteristic; the targeted image forming characteristic also hereinafter referred to as "targeted aberration" as appropriate) such as information on a line width abnormal value, via input unit 45. Then, when instructions are given that the input is complete, the process proceeds to
25 step 106, where conditions are set for creating a Zernike sensitivity table of the targeted aberration input in step 104, and the step then proceeds to step 108. The information on targeted aberration entered in step 104 is

not limited to one kind. That is, various kinds of image forming characteristics of projection optical system PL can be designated as the targeted aberration at the same time.

5 In step 108, when the screen for inputting information on the projection optical system is displayed on display unit 44, the process then goes to step 110 and waits for the information to be input. And after the operator inputs information on projection optical system
10 PL, specifically information on the numerical aperture (N.A.), illumination conditions (such as setting of the illumination system aperture stop or coherence factor σ), wavelength or the like via input unit 45, the process goes to step 112, where the input information is stored
15 in the RAM and when the screen for inputting information on the aberration is displayed on display unit 44, the procedure moves on to step 114 and waits for the information to be input.

 The operator then individually inputs information
20 on a given aberration, or to be more specific, individually inputs the same value, such as 0.05λ , into the input screen for aberration information for the coefficient values of each term of the Zernike polynomial when they are, for example, coefficient Z_2 of the second
25 term up to coefficient Z_{37} of the 37th term.

 When input of the above aberration is complete, the process proceeds to step 116, where a graph is made (for example, a Zernike sensitivity table on a line width

abnormal value), based on the information of aberration that has been input. For example, the vertical axis of the map can be a targeted aberration corresponding to the 0.05λ or its index value (such as the line width abnormal value, which is the index value of coma), and the horizontal axis can be the coefficients of each term of the Zernike polynomial. The process then proceeds to step 118, where the screen for confirming the completion of the above graph is displayed on display unit 44.

10 In the next step, step 120, operation is suspended until the operator inputs the confirmation. When the operator inputs the confirmation via input unit 45 such as the mouse, the process then proceeds to step 122, where the variation table made in the above step 116 is
15 stored in the RAM, and the decision is made whether or not the Zernike sensitivity table is made for all the targeted aberrations input in step 104. When the decision in step 122 is negative, the process then returns to step 116 to make a Zernike sensitivity table and for the next
20 targeted aberration. In the embodiment, one variation table is made for one targeted aberration without changing any conditions such as the numerical aperture of projection optical system PL or the illumination conditions, however, for example, a plurality of
25 variation tables may be made for one targeted aberration changing at least either the numerical aperture of projection optical system PL or the illumination conditions. In addition, the pattern subject to

simulation may be in plurals, and the variation table for the target aberration may be made per pattern.

When the Zernike sensitivity table has been made for all the targeted aberrations and the confirmation has
5 been input in step 120, the decision turns positive in step 122 and the process proceeds to the next step, step 124.

In step 124, the decision is made whether a flag F is "1" or not. Flag F indicates whether data of
10 positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$), which will be described later, has been input. In this case, because data of the positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) has not been input, the decision is negative, which takes the process to a measuring subroutine 126, where wavefront aberration is
15 measured using measurement reticle R_T at a plurality of measurement points (hereinafter, n) in the field of projection optical system PL in the following manner.

That is, in subroutine 126, first of all, in step 202 in Fig. 8, measurement reticle R_T is loaded onto
20 reticle stage RST via a reticle loader (not shown).

In the next step, step 204, wafer stage WST is moved via the wafer-stage driving portion 56 while the output of laser interferometer 54W is being monitored, and a pair of reticle alignment reference marks formed on
25 reference mark plate FM is positioned at a predetermined reference position. The reference position, in this case, is set so that, for example, the center of the pair of reference marks coincides with the origin of the stage

coordinate system set by laser interferometer 54W.

In step 206, the pair of reticle alignment marks RM1 and RM2 formed on measurement reticle R_T and the corresponding reticle alignment reference marks are
5 observed with the reticle alignment microscopes at the same time, and reticle stage RST is finely driven in the XY two-dimensional plane via a driving system (not shown) so as to make positional deviations minimal between projected images of reticle alignment marks RM1 and RM2
10 on reference plate FM and the reticle alignment reference marks. With this operation, reticle alignment is completed, and the center of the reticle substantially coincides with the optical axis of projection optical system PL.

15 In the next step, step 208, wafer W is loaded onto Z-tilt stage 58 via a wafer loader (not shown). The surface of wafer W is coated with a resist (photosensitive material).

In the next step, step 210, the aperture size of
20 reticle blind 30 is set so that a rectangular shaped illumination area is formed to cover the entire surface of measurement reticle R_T including all the condenser lenses 65_{i,j}, with the exception of openings 72₁, 72₂, and the length of the illumination area in the X-axis
25 direction length is within the maximum width of the X-axis direction of lens-attached member 62. In addition, at the same time, illumination system aperture stop plate 24 is rotated via driving unit 40 to set a predetermined

aperture stop, such as the small σ stop, to the optical path of illumination light EL. With this operation, the preparatory operations for exposure are completed.

In the next step, step 212, control information TS
 5 is given to light source 16 so that laser beam LB is generated, and exposure is performed by irradiating reticle R_T with illumination light EL. With this operation, measurement patterns $67_{i,j}$ are each simultaneously transferred via pinhole-like openings $70_{i,j}$
 10 and projection optical system PL, as is shown in Fig. 4. As a result, reduced images $67'_{i,j}$ (latent images) of measurement patterns $67_{i,j}$ as is shown in Fig. 9A are formed two-dimensionally on the resist layer of wafer W, spaced apart at a predetermined distance.

15 In the next step, step 214, the reference pattern is sequentially overlaid and transferred onto the images of the measurement patterns already formed on wafer W by a step-and-repeat method. Following are the details of the sequence, from a. through g.

20 a. First, reticle stage RST is driven in the Y-axis direction by a predetermined distance via a driving system (not shown), so that the center of reference pattern 74_1 coincides with optical axis AX, based on the measurement values of a reticle laser interferometer (not
 25 shown) and the designed positional relation between the center of the reticle and reference pattern 74_1 .

b. Next, when the above movement is completed, the aperture of reticle blind 30 is set via a driving system

(not shown) so that the illumination area of illumination light EL is set limited to a rectangular area having a predetermined size, on the lens-holding member 62 including opening 72₁ (but does not include any condenser lenses).

c. Next, wafer stage WST is moved so that the center of the area where latent image 67'_{1,1} of the first measurement pattern 67_{1,1} is formed on wafer W is positioned substantially on optical axis AX, while the measurement values of laser interferometer 54W are monitored.

d. Then, main controller 50 gives control information TS to light source 16 for generating laser beam LB, and performs exposure by irradiating illumination light EL on reticle R_T. With this operation, reference pattern 74₁ is overlaid and transferred onto the area where the latent image of measurement pattern 67_{1,1} is already formed (referred to as area S_{1,1}) on the resist layer of wafer W. As a result, the latent image 67'_{1,1} of the first measurement pattern 67_{1,1} and the latent image 74'₁ of the reference pattern 74₁ are formed on area S_{1,1} in a positional relation shown in Fig. 9B.

e. Next, a designed arrangement pitch p of measurement patterns 67_{1,j} on wafer W is calculated, based on an arrangement pitch of measurement patterns 67_{1,j} on reticle R_T and the projection magnification of projection optical system PL. Then, wafer stage WST is moved in the X-axis direction by pitch p so that the center of an area

$S_{1,2}$ where the latent image of the second measurement pattern 67_{1,2} is formed substantially coincides with optical axis AX.

f. Then, control information TS is given to light source 16 so that laser beam LB is emitted and exposure is performed by irradiating illumination light EL on reticle R_T . With this operation, reference pattern 74₁ is overlaid and transferred onto area $S_{1,2}$ on wafer W.

g. Hereinafter, stepping operations between areas and exposure operation are repeated in the manner described above, and latent images of the measurement patterns and the reference pattern are formed in areas $S_{i,j}$ on wafer W, as shown is in Fig. 9B.

When exposure is completed in this manner, the process goes to step 216, where wafer W is unloaded from Z-tilt stage 58 via the wafer loader (not shown) and is transferred to a coater-developer (not shown; hereinafter, "C/D" for short), which is connected in line with chamber 11. The process then proceeds to step 218, where data of positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$), which will be described later, will be input.

Then, in the C/D, wafer W is developed, and the resist images of the measurement pattern and the reference pattern are formed on wafer W in the same arrangement as shown in Fig. 9B, in each of the areas $S_{i,j}$ arranged in a matrix.

Then, wafer W that has been developed is removed from the C/D, and overlay errors are measured in each of

the areas $S_{i,j}$ by an external overlay measuring unit (registration measuring unit). And, based on the results, positional errors (positional deviations) of the resist images of measurement patterns $67_{i,j}$ with respect to the corresponding images of reference pattern 74_1 are calculated.

Various methods of calculating the positional deviations can be considered, however, from the viewpoint of improving accuracy, performing statistical computation based on measured raw data is preferred.

In this manner, the XY two-dimensional positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) of the measurement patterns from the respective reference patterns are obtained for the areas $S_{i,j}$. Then the data on positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) for the areas $S_{i,j}$ is input by an operator via input unit 45. And, when the decision in step 218 is positive, the process then returns to step 128 in the main routine of Fig. 7.

Incidentally, data on positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) in the areas $S_{i,j}$ can be input online from the external overlay measuring. And, also in this case, the process returns to step 128 in the main routine responding to the input.

In step 128 in the main routine, the first program is loaded into the main memory, and then the process goes to step 130, where wavefronts (wavefront aberrations) corresponding to each of the areas $S_{i,j}$, or in other words, the first measurement point through the n^{th} measurement

point within the field of projection optical system PL, which in this case are the coefficients of each of the terms in the Zernike polynomial such as the coefficient Z_2 of the second term through the coefficient Z_{37} of the 37th term, are calculated according to the first program, based on the principle described below. When the main memory has enough empty area, the third program, which is loaded in advance, can be stored in the main memory, however, in this case the main memory does not have enough empty area, therefore, the third program is temporarily unloaded from the main memory to its original area in storage unit 42, and then the first program is loaded in the main memory.

In the embodiment, the wavefront of projection optical system PL is obtained by calculation according to the first program, based on the above positional deviations $(\Delta\xi, \Delta\eta)$. Before describing this process, as a premise, the physical relation between the positional deviations $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ and the wavefront will be briefly described, referring to Figs. 4 and 5.

As is representatively shown by a measurement pattern $67_{k,1}$ in Fig. 4, of the diffraction light generated from measurement pattern $67_{i,j}$, the light having passed through pinhole-shaped opening $70_{i,j}$ passes through the pupil plane of projection optical system PL at different positions, depending on where in measurement pattern $67_{k,1}$ the light comes from. That is, the wavefront at each position on the pupil plane corresponds to the

optical wavefront via position, in the corresponding positions in measurement pattern $67_{k,1}$. And, when there is no aberration at all in projection optical system PL, such wavefront on the pupil plane of projection optical system PL is supposed to be an ideal wavefront (in this case, a flat plane) as in shown by a reference F_1 . However, because there are no such projection optical systems that are free of aberration, the wavefront on the pupil plane becomes a curved surface such as wavefront F_2 , which is indicated by a dotted curve. Therefore, the image of measurement pattern $67_{i,j}$ is formed at a deviated position on wafer W, according to the angle that the curved surface F_2 makes with respect to the ideal wavefront.

Meanwhile, as shown in Fig. 5, light diffracted by the reference pattern 74_1 (or 74_2) enters projection optical system PL directly, without being restricted by the pinhole-shaped aperture and is imaged on wafer W via projection optical system PL. Moreover, because exposure of the reference pattern 74_1 is performed in a state where the center of reference pattern 74_1 is positioned on the optical axis of projection optical system PL, the imaging beam generated from reference pattern 74_1 is substantially free from aberration caused by projection optical system PL, so that the image is formed without positional deviation in an extremely small area that includes the optical axis.

Therefore, the positional deviations $(\Delta\xi, \Delta\eta)$

directly reflect the gradients of the wavefront to an ideal wavefront, and based on such positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) the wavefront can be reproduced. As is obvious from the above physical relation between the positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) and the wavefront, the principle of this embodiment for calculating the wavefront is the known Shack-Hartmann wavefront calculation principle.

Next, the method of calculating the wavefront based on the above positional deviations will be described briefly.

As is described above, positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) correspond to values of the gradient of the wavefront, and by differentiating the positional deviations the shape of the wavefront (or to be more precise, deviations from the reference plane (the ideal plane)) is obtained. When the wavefront (deviations from the reference plane) is expressed as $W(XY)$ and the proportional coefficient is expressed as k , then the relation in the following equations (2) and (3) exist.

$$\Delta\xi = k \frac{\partial W}{\partial x} \dots (2)$$

$$\Delta\eta = k \frac{\partial W}{\partial y} \dots (3)$$

Because it is not easy to differentiate the gradient of the wavefront given only as positional deviations, the surface shape is expanded in series so that it fits the wavefront. In this case, an orthogonal system is chosen for the series. The Zernike polynomial is a series suitable to expand a surface symmetrical with

respect to an axis in, whose component in the circumferential direction is a trigonometric series. That is, when wavefront W is expressed using a polar coordinate system (ρ, θ) , the Zernike polynomial is expressed as $R_n^m(\rho)$ and is expanded as the equation (4):

$$W(\rho, \theta) = \sum_n A_n^0 R_n^0(\rho) + \sum_n \sum_m (A_n^m \cos m\theta + B_n^m \sin m\theta) R_n^m(\rho) \dots (4)$$

Because the Zernike radial polynomials $R_n^m(\rho)$ are known, the description thereof is omitted. Because the terms are orthogonal, coefficients A_n^m , B_n^m of the terms can be determined independently. Using only finite terms provides a sort of filtering.

Because the differentials are detected as the above positional deviations in actual, the fitting needs to be performed on the differential coefficients. In the polar coordinate system $(x=\rho\cos\theta, y=\rho\sin\theta)$, the partial differentials are represented by the equations (5), (6):

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial \rho} \cos\theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial W}{\partial \theta} \sin\theta \dots (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial W}{\partial \rho} \sin\theta + \frac{1}{\rho} \frac{\partial W}{\partial \theta} \cos\theta \dots (6)$$

Because the differentials of Zernike polynomials are not orthogonal, the fitting needs to be performed in the least-squares method. Because the information (amount of positional deviation) is given in the X and Y directions for each measurement pattern, when the number of measurement patterns (for example, n = around 81 to 400) is expressed as n , then the number of observation

equations derived from the above equations (2) through (6) is $2n$ (= around 162 to 800).

Each term of the Zernike polynomial corresponds to an optical aberration. Furthermore, lower-order terms substantially correspond to Seidel's aberrations. Therefore, by using the Zernike polynomial, the wavefront aberration of projection optical system PL can be obtained.

Incidentally, an invention related to a technology in calculating wavefront aberration is disclosed in the U.S. Patent No. 5,978,085. In this disclosure, a mask that has the same structure as the measurement reticle R_T is used, and a plurality of measurement patterns formed on the mask are sequentially exposed on a substrate via separately provided pinholes and a projection optical system, while a reference pattern on the mask is exposed on the substrate via the projection optical system without passing through condenser lens and pinholes. Then, positional deviations of the resist images of the plurality of measurement patterns from the respective resist images of the reference pattern are measured, and by predetermined computation, the wavefront aberration is calculated.

The computation procedure of the first program is determined according to the above principle, and by executing the first program the wavefront (wave-front aberration) for the first up to the n^{th} measurement point within the field of projection optical system PL, or in

this case, the coefficients of terms of the Zernike polynomial, such as the coefficient Z_2 of the second term up to the coefficient Z_{37} of the 37th term, can be obtained.

After the data of the wavefront (the coefficients of terms of the Zernike polynomial, such as the coefficient Z_2 of the second term through the coefficient Z_{37} of the 37th term) is obtained, the process proceeds to step 132, which sets the flag F to one and stores the data of the wavefront in a temporary storage area in the RAM.

In step 134, the third program is reloaded into the main memory. In this case, as a matter of course, the third program is loaded after the first program is unloaded into the original area in storage unit 42.

In the next step, step 136, according to the third program, one of the targeted aberrations input in step 104 is calculated for each measurement point by the following equation (7), using the Zernike sensitivity table created earlier.

$$A = K \times \{ Z_2 \times (\text{the table's value}) + Z_3 \times (\text{the table's value}) + \dots + Z_{37} \times (\text{the table's value}) \}. \quad \dots (7)$$

A, in this case, is a targeted aberration in the projection optical system PL such as astigmatism or field curvature, or an index value of the targeted aberration such as a line-width abnormal value, which is an index value of coma.

K is a proportional constant which is set according to the sensitivity of the resist and so forth.

In the next step 138, the targeted aberration or its index value calculated for each measurement point in the manner above is shown on display unit 44. And, by this display, the operator can easily recognize the aberration of the projection optical system PL in question.

In the next step, step 140, the decision is made whether or not all the targeted aberrations (aberrations (image forming characteristics) for which conditions have been set) have been calculated. If the decision is negative, the process returns to step 136, and the next targeted aberration is calculated and displayed.

When all the targeted aberrations have been calculated in the manner above, the process proceeds to step 142 where a screen for verifying whether the simulation is to continue is displayed on display unit 44, and then the process proceeds to step 144 and stays there until a predetermined time has passed.

When the predetermined time has passed, the step moves onto step 146, where decision is made on whether or not instructions to continue the simulation has been input. When the simulation is to be continued, instructions for continuance should be given during the predetermined time, therefore, if the answer in step 146 is negative, the process of this routine ends based on the decision that the simulation does not have to

continue.

Meanwhile, when instructions to continue the simulation have been input during the predetermined time, the process returns to step 102, and hereinafter repeatedly performs the process and decision-making, according to the next conditions specified in the simulation. However, in this case, because the flag F is set, the decision in step 124 is positive so the process goes from step 124 to step 136.

That is, when the wavefront aberration of projection optical system PL is measured, the simulation is continued without re-measuring the wave-front aberration.

As is described above, in the embodiment, the operator only has to sequentially input necessary items via input unit 45 according to the screen, as well as input instructions to measure the wavefront aberration, or in addition, also input data of the positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) in the each of the areas $S_{i,j}$ measured by the overlay measuring unit. And, with this operation, because the targeted aberration specific to the measurement pattern of projection optical system PL (including lower-order and higher-order components of coma, astigmatism, and spherical aberration) is automatically and accurately calculated and displayed on display unit 44, the aberration can be easily and accurately recognized. Furthermore, even when the targeted aberration are in plurals, the aberration can be

accurately recognized, by measuring the wavefront aberration of projection optical system PL only once. In this case, while there are various forms for displaying the targeted aberration, the form is preferred where the results are expressed numerically in a way that is easy for anyone to understand. In such a case, analysis of the coefficients of terms of the Zernike polynomial is not required.

Moreover, as is obvious from the flow chart in Fig. 7, the exposure apparatus in the embodiment can easily set the optimum exposure condition corresponding to the subject patterns. That is, the optimum exposure condition can be easily set when repeating the steps 102 and onward, by inputting the same subject pattern and the same targeted aberration (which may be a plurality of types) to the condition setting screen in step 102, and by sequentially inputting different illumination conditions, numerical apertures, wavelengths, and the like to the input screen in step 108 where information related to projection optical system PL is input. As a consequence, in step 138, the condition is defined in which the target aberration value shown in step 138 is minimal. Needless to say, the software can be modified so that main controller 50 automatically defines and sets the optimum exposure condition based on the definition. This is because, for example, the illumination condition can be changed respectively by selecting a different aperture stop of the illumination system aperture stop plate 24,

the numerical aperture of the projection optical system PL can be set freely within a certain range by adjusting aperture stop 15 in Fig. 1 of projection optical system PL, and the wavelength of the illumination light EL can be changed by giving such control information TS to light source 16.

Needless to say, information on the defined exposure condition may be used when the operator creates a process program file (data file for setting exposure conditions).

Next, the method of adjusting the image forming characteristic of projection optical system PL will be described which is performed by a service technician of the exposure apparatus maker or the like, in a semiconductor manufacturing factory.

As a premise, the CD-ROM containing the first through third programs and the database created in the manner above is set in drive unit 46, and the first through third programs are installed in storage unit 42, along with the database associated with the second program.

When instructions for measuring the wavefront aberration is input by the service technician or the like, main controller 50 (CPU) transfers the pattern of measurement reticle R_T onto wafer W for measuring the wavefront aberration at a plurality of (in this case, n) measurement points in the field of projection optical system PL in the same procedure as is previously

described (refer to Fig. 8). Wafer W is then developed in the C/D, and when wafer W has been developed, the resist images of the measurement pattern and the reference pattern are formed in each of the areas $S_{i,j}$ arranged in a matrix on wafer W, in the same arrangement as is shown in Fig. 9B.

After that, wafer W that has been developed is removed from the C/D, and overlay errors are measured with an external overlay measuring unit (registration measuring unit) in the areas $S_{i,j}$. And, based on the results, position errors (positional deviations) of the resist images of measurement patterns 67_{i,j} from the corresponding images of the reference pattern 74₁ are calculated.

Then, the data on the positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) in the areas $S_{i,j}$ is input into main controller 50 by the service technician or the like via input unit 45. Incidentally, the data on the positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) in the areas $S_{i,j}$ may be input into main controller 50 online from the external overlay measuring unit.

In any case, responding to the above input, the CPU of main controller 50 loads the first program in the main memory, and based on the positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$), the wavefront (wavefront aberration) for the areas $S_{i,j}$ corresponding to the first through n^{th} measurement point within the field of projection optical system PL, in this case, the coefficients for each of the terms in the Zernike polynomial, such as the coefficient Z_2 of the

second term up to the coefficient Z_{37} of the 37th term of the Zernike polynomial, are computed according to the first program.

In the description below, data of the wavefront
 5 (wavefront aberration) for the first to the n^{th} measurement point within the field of projection optical system PL is expressed by a column matrix Q , as in equation (8):

$$Q = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \dots (8)$$

In equation (8), the elements P_1 to P_n of matrix Q
 10 are each a column matrix (vector) made up of the coefficients of the second to the 37th terms (Z_2 to Z_{37}) of the Zernike polynomial.

When matrix Q is calculated in the manner above,
 main controller 50 then stores the values in the
 15 temporary storing area in the RAM.

Next, the CPU in main controller 50 loads the
 second program into the main memory from storage unit 42,
 and computes the adjustment amount of the movable lenses
 13₁ through 13₄ previously described in directions of each
 20 degree of freedom, according to the second program.

Between data Q of the wavefront (wavefront
 aberration) for the first to n^{th} measurement points, the
 matrix O stored in the CD-ROM as the database, and an

adjustment amounts vector P of the movable lenses 13_1 through 13_4 in directions of each degree of freedom, a relation as in the following equation (9) exists:

$$Q = O \times P \quad (9)$$

- 5 In equation (9), P is a column matrix (vector) having m elements as in equation (10):

$$P = \begin{bmatrix} ADJ1 \\ ADJ2 \\ \vdots \\ \vdots \\ ADJm \end{bmatrix} \dots (10)$$

- Therefore, from the above equation (9), by computing the following equation (11) using the least-squares method, each of the elements $ADJ1$ to $ADJm$ of P , or in other words, adjustment amount (target adjustment amount) of movable lenses 13_1 through 13_4 in directions of each degree of freedom can be obtained.

$$P = (O^T \times O)^{-1} \times O^T \times Q. \quad (11)$$

- 15 In equation (11), O^T is the transposed matrix of matrix O and $(O^T \times O)^{-1}$ is the inverse matrix of $(O^T \times O)$.

- That is, the second program is a program for performing a least-squares method computation by the above equation (11) using the database. Therefore, the CPU calculates the adjustment amount $ADJ1$ to $ADJm$ according to the second program while sequentially reading the database from the CD-ROM into the RAM, and then shows the adjustment amounts on the screen of
- 20

display unit 44 as well as stores the values in storage unit 42.

Next, main controller 50 gives instruction values to image forming characteristics correction controller 48 according to the adjustment amounts ADJ1 through ADJm stored in storage unit 42 on the drive amounts of the movable lenses 13₁ through 13₄ in directions of each degree of freedom. With this operation, image forming characteristics correction controller 48 controls the applied voltage to each of the driving devices that drives movable lenses 13₁ through 13₄ in directions of each degree of freedom, and at least one of a position and posture of movable lenses 13₁ through 13₄ is adjusted substantially at the same time, correcting the image forming characteristic of projection optical system PL such as distortion, field curvature, coma, spherical aberration, and astigmatism. As for coma, spherical aberration and astigmatism, not only the lower orders but also the higher orders of the aberration can be corrected.

As is described above, in the embodiment, when adjusting the image forming characteristic of projection optical system PL, the service technician or the like only has to input measurement instructions of the wavefront aberration via input unit 45, or in addition, input the positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) for the areas $S_{i,j}$ measured by the overlay measuring unit. With this operation, the image forming characteristic of projection optical system PL is adjusted almost automatically, with

high accuracy.

Instead of the above equation (11), the following equation, equation (12), which is a computation program for performing a least-squares computation, may be used
5 as the second program.

$$P = (O^T \times G \times O)^{-1} \times O^T \times G \times Q. \quad (12)$$

In equation (12), G is a diagonal matrix with n rows and n columns as in the following equation, equation (13):

$$G = \begin{bmatrix} A_{1,1} & & & & \\ & A_{2,2} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & \ddots \\ & & & & & A_{n,n} \end{bmatrix} \quad \dots(13)$$

10 In addition, elements $A_{i,i}$ ($i=1$ through n) of matrix G each are a diagonal matrix with weight parameters δ as the elements. In this case, $A_{i,i}$ is a diagonal matrix with 36 rows and 36 columns expressed as in equation (14):

$$A_{i,i} = \begin{bmatrix} \delta_{1,1} & & & & \\ & \delta_{2,2} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & \ddots \\ & & & & & \delta_{36,36} \end{bmatrix} \quad \dots(14)$$

Therefore, each of elements $\delta_{j,j}$ ($j=1$ through 36) of diagonal matrix $A_{i,i}$ represents the weight parameter corresponding to the coefficients Z_2 through Z_{37} of the second term to the 37th term of the Zernike polynomial measured at each measurement point. So, for example, when low order distortion obtained from the measurement results of one or a plurality of measurement points is to be corrected in particular, the values of the weight parameters such as $\delta_{1,1}$ and $\delta_{2,2}$ at the corresponding measurement points only have to be made heavier than the rest of the weight parameters. In addition, for example, when spherical aberration (00 component) obtained from the measurement results of one or a plurality of measurement points is to be corrected in particular including the high order component, the mean of weight parameters $\delta_{8,8}$, $\delta_{15,15}$, $\delta_{24,24}$, $\delta_{35,35}$, $\delta_{36,36}$ at the corresponding measurement points only has to be made heavier than the mean of the remaining weight parameters.

In this case, another program that works with the second program is preferably provided, and the screens for specifying a measurement point and inputting the weight for each of the terms of the Zernike polynomial are to be sequentially displayed by the program. With such an arrangement, the service technician can easily set the weight parameters described above using input unit 45, by inputting the measurement point when the screen for specifying the measurement point is displayed and by inputting the weight of the term of the Zernike

polynomial corresponding to the aberration to be corrected in particular heavier than the other terms when the screen for inputting the weight is displayed. Especially, on the input screen for inputting the weight, a plurality of types of input referred to above is preferred, more specifically, other than being able to input the weight of each term, input of the weight divided into four groups such as 00, 10, 30, and 40 is preferred. In the latter case, a desired set value can be input by each θ group. 00 generically refers to coefficients of the terms of the Zernike polynomial (in this case, the first and fourth terms are excluded) that do not include sin or cos (Z_9 , Z_{16} , Z_{25} , Z_{36} , and Z_{37}); 10 generically refers to coefficients of terms (in this case, the second and third terms are excluded) with $\sin\theta$ or $\cos\theta$ (Z_7 , Z_8 , Z_{14} , Z_{15} , Z_{23} , Z_{24} , Z_{34} , and Z_{35}); 20 generically refers to coefficients of terms with $\sin 2\theta$ or $\cos 3\theta$ (Z_5 , Z_6 , Z_{12} , Z_{13} , Z_{21} , Z_{22} , Z_{32} , and Z_{33}); 30 generically refers to coefficients of terms with $\sin 3\theta$ or $\cos 3\theta$ (Z_{19} , Z_{20} , Z_{30} , and Z_{31}), and 40 generically refers to coefficients of terms with $\sin 4\theta$ or $\cos 4\theta$ (Z_{28} and Z_{29}).

In the embodiment, as is previously described, main controller 50 executes the third program and the first program so that the image forming characteristic (aberration) of projection optical system PL to be known can be recognized almost automatically, when the operator or the like sequentially inputs necessary issues via input unit 45 according to the display on the screen and

inputs instructions to measure the wavefront aberration, or in addition, inputs the data on positional deviations ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) for the areas $S_{i,j}$ measured by the overlay measuring unit. Therefore, after the image forming characteristic of projection optical system PL is adjusted in the manner previously described by making use of such arrangement, the service technician or the like performs the simulation previously described so that the state of whether the image forming characteristic is adjusted as planned can be confirmed on the display screen. When the adjustment is not proceeding as planned, by inputting a plurality of image forming characteristics as information related to the targeted image forming characteristic, the image forming characteristic that is not adjusted as planned can be recognized, therefore, necessary countermeasures can be taken without further delay.

In this embodiment, other than the maintenance operation, the operator or the like may also give instructions to adjust the image forming characteristic of projection optical system PL even during normal operation. After the operator or the like gives the predetermined instructions described earlier (including input of condition setting and input of information related to the projection optical system), a process similar to the above simulation is performed in the same manner by the CPU of main controller 50 to create a similar Zernike variation chart. Then, when the wavefront

aberration is measured and the positional deviation data input, the CPU of main controller 50 sequentially calculates the targeted image forming characteristic in the manner described above. In this case, instead of
5 displaying information related to the targeted image forming characteristic on display unit 44, or with the display, the CPU may calculate the drive amount of the movable lenses 13₁ to 13₄ in directions of each degree of freedom so that the targeted aberration is optimal (such
10 as zero or minimal) according to, for example, the second program by the least squares method in the same manner as before. This can be achieved by a simple modification of the software.

Then, the CPU in main controller 50 provides the
15 instruction values of the calculated drive amount to image forming characteristics correction controller 48. With this operation, image forming characteristics correction controller 48 controls the applied pressure to each of the driving devices that drives movable lenses 13₁
20 through 13₄ in directions of each degree of freedom, and at least one of a position and posture of movable lenses 13₁ through 13₄ is adjusted, correcting the image forming characteristic of projection optical system PL such as distortion, field curvature, coma, spherical aberration,
25 and astigmatism. As for coma, spherical aberration and astigmatism, not only the lower orders but also the higher orders of the aberration can be corrected.

With exposure apparatus 10 in the embodiment, when

semiconductor devices are manufactured, reticle R for manufacturing the devices is loaded onto reticle stage RST as the reticle, and then preparatory operations such as the reticle alignment, the so-called baseline measurement, and the wafer alignment such as the EGA (Enhanced Global Alignment) are performed.

Details on the above preparatory operations such as the reticle alignment and the baseline measurement are disclosed in, for example, Japanese Patent Application Laid-open Application No.04-324923 and the corresponding U.S. Patent No. 5,243,195. Furthermore, details on EGA that follows are disclosed in, for example, Japanese Patent Application Laid-open No. 61-44429 and the corresponding U.S. Patent No. 4,780,617. As long as the national laws in designated states or elected states, to which this international application is applied, permit, the above disclosures are incorporated herein by reference.

When the preparatory operations are completed, exposure based on the step-and-repeat method is performed, similar to the measurement of the wavefront aberration. However, in this case, the stepping operation is performed based on the results of wafer alignment with the stepping in between shots serving as a unit. Incidentally, because the operation during exposure is not any different from an ordinary stepper, a detailed description is omitted.

Next, the method of making exposure apparatus 10

will be described.

When making exposure apparatus 10, first of all, illumination optical system 12 comprising optical elements such as a plurality of lenses and mirrors, projection optical system PL, and the reticle stage system and the wafer stage system made up of many mechanical components, are each assembled as units, while adjustment such as optical adjustment, mechanical adjustment, and electric adjustment are performed on each of the units so that a desirable performance can be secured in each unit.

Next, illumination optical system 12 and projection optical system PL are incorporated into the exposure apparatus main body, as well as the reticle stage system and the wafer stage system, and then the wiring and piping are connected.

Then, optical adjustment is performed on illumination optical system 12 and projection optical system PL. This is because such optical systems, especially the image forming characteristic of projection optical system PL, slightly change after being incorporated into the exposure apparatus main body. In the embodiment, the first, second, and third programs and the database previously described can also be used in the optical adjustment of projection optical system PL which is performed after projection optical system PL is installed in the exposure apparatus main body.

As a first method of optically adjusting projection

optical system PL, a worker performing the adjustment operation measures the wavefront aberration of projection optical system PL using measurement reticle R_T described earlier in the manner already described. Then, by

5 inputting the measurement results to main controller 50, main controller 50 then performs the processes according to the first and second program, so that the image forming characteristic of projection optical system PL is adjusted as accurately as possible.

10 Then, for the purpose of confirming the adjustment results, the wavefront aberration of projection optical system PL is re-measured using measurement reticle R_T described earlier in the manner and procedure previously described. Then, by inputting the measurement results of
15 the wavefront aberration to main controller 50, main controller 50 then performs the processes according to the first and third program, and shows the astigmatism, field curvature, and/or a line-width abnormal value corresponding to coma of projection optical system PL
20 after the adjustment on the screen. Aberrations that have not been corrected at this stage, mainly the high order aberrations, can be determined as aberrations that are difficult to adjust automatically, therefore, attachment of lenses or the like may be re-adjusted, if necessary.

25 As a second method of optically adjusting projection optical system PL, when a worker who performs adjustment in the manufacturing stage inputs instructions (including input of condition setting and input of

information related to the projection optical system) like the adjustment described earlier, the CPU in main controller 50 performs processes according to the third program and a similar Zernike variation chart is created.

5 Then, the wavefront aberration of projection optical system PL is measured in the procedure previously described using measurement reticle R_T also described earlier. And, by inputting the measurement results of wavefront aberration to main controller 50, the CPU in
10 main controller 50 performs processing according to the first and third programs previously described, and the targeted aberration is sequentially calculated. Then, instruction values on drive amount of movable lenses 13₁ to 13₄ in directions of each degree of freedom are given
15 to image forming characteristics correction controller 48 that optimizes (zero or minimal) such targeted aberration. With this operation, image forming characteristics correction controller 48 adjusts the targeted image forming characteristic of projection optical system PL
20 such as distortion, field curvature, coma, spherical aberration, and astigmatism, with as much precision as possible.

Then, for the purpose of confirming the adjustment results, the simulation referred to earlier is performed
25 again and astigmatism, field curvature, a line-width abnormal value corresponding to coma, and the like of projection optical system PL that has been adjusted is displayed on screen. The aberrations that are not

corrected at this point, mainly high order aberration, can be judged as aberration difficult to adjust automatically, therefore, the lens assembly can be re-adjusted if necessary.

5 When a desired performance cannot be obtained even when the above re-adjustment has been performed, the lenses may have to be reprocessed or replaced. In order to simplify the reprocessing of the optical elements of projection optical system PL, the wavefront aberration
10 referred to earlier may be measured using a wavefront measurement unit or the like specified for wavefront measurement before incorporating projection optical system PL into the exposure apparatus main body, and based on the measurement results, whether or not there
15 are optical elements that require reprocessing and its position can be identified. Then, the reprocessing of the identified optical element and the readjustment of the other optical elements may be performed in parallel.

 In addition, the optical elements of projection
20 optical system PL may be replaced per unit, or when the projection optical system has a plurality of lens barrels, they may be replaced per barrel. Furthermore, when reprocessing the optical device, its surface may be processed non-spherically, if necessary. In addition,
25 when adjusting projection optical system PL the position (including the spacing between other optical elements) or inclination may simply be changed, or especially when the optical element is a lens element, its eccentricity may

be changed or it may be rotated around optical axis AX.

Then, overall adjustment (such as electrical adjustment and operation verification) is further performed. By such operations, exposure apparatus 10 in the embodiment that can transfer a pattern of reticle R on wafer W with good precision using projection optical system PL whose optical properties have been adjusted with high precision can be made. The exposure apparatus is preferably built in a clean room where the temperature and the degree of cleanliness are controlled.

As is obvious from the description so far, in the embodiment, main controller 50 constitutes a computing unit; the first computing unit and the second computing unit, and main controller 50 and image forming characteristics correction controller 48 constitutes an image forming characteristics adjusting unit. Furthermore, the measurement reticle R_T , the external overlay measuring unit, and main controller 50 make up a measuring unit for measuring the wavefront aberration of projection optical system PL.

As has been described in detail, according to the exposure apparatus in the embodiment, when the measuring unit (such as R_T and 50) measures the wavefront aberration of projection optical system PL according to instructions from the operator, and main controller 50 calculates the targeted image forming characteristic of projection optical system PL, based on the wavefront aberration of projection optical system PL which has been measured and

the Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic corresponding to the aberration information given when the subject pattern was exposed. By using the Zernike sensitivity table in the manner
5 described above, the targeted image forming characteristic can be calculated with only one measuring of the wavefront aberration. In this case, in the measuring, as for spherical aberration, astigmatism, and coma, not only the low order aberration, but also a total
10 aberration including the high order aberration can be calculated.

In addition, since the targeted image forming characteristic is corrected as much as possible by image forming characteristics adjusting unit (48 and 50) based
15 on the calculation results of the targeted aberration (image forming characteristic), the image forming characteristic of projection optical system PL is consequently adjusted according to the subject pattern.

In addition, according to exposure apparatus 10 in
20 the embodiment, parameters that denote a relationship between the adjustment of specific optical elements for adjustment (movable lenses 13₁ through 13₄) and the variation of the image forming characteristic of projection optical system PL are obtained in advance, and
25 the parameters are stored as a database in storage unit 42. And, based on instructions from the service technician or the like on adjustment, the wavefront aberration of projection optical system PL is actually

measured, and then when the measurement data (actual measurement data) is input via input unit 45, main computer 50 calculates the target adjustment amount of movable lenses 13₁ through 13₄, using the actual measurement data of the wavefront aberration input via input unit 45 and a relation expression between the parameters and the movable lenses 13₁ through 13₄ (equation(11) or equation(12)). Because the above parameters are obtained in advance and stored in storage unit 42, when the wavefront aberration is actually measured, the target adjustment amount of the movable lenses 13₁ through 13₄ for correcting the wavefront aberration can be easily calculated by simply inputting the actual measurement values of the wavefront aberration via input unit 45. In this case, data that are difficult to obtain, such as the design data of the lenses are not necessary, as well as a difficult ray-tracing calculation.

Then, the target adjustment amount is given as instruction values to image forming characteristics correction controller 48 from main controller 50, and image forming characteristics correction controller 48 adjusts movable lenses 13₁ through 13₄ according to the target adjustment amount, performing a simple but highly precise adjustment on the image forming characteristic of projection optical system PL.

In addition, according to exposure apparatus 10 in the embodiment, when exposure is preformed, because the pattern of reticle R is transferred onto wafer W via

projection optical system PL whose image forming characteristic is adjusted in the manner described above according to the subject pattern or whose image forming characteristic is adjusted with high precision based on the measurement results of wavefront aberration, fine patterns can be transferred onto wafer W with good overlay accuracy.

In the above embodiment, the case has been described where, on simulation, various types of information including information on the subject pattern, information on the targeted image forming characteristic, information on the projection optical system, and information on the aberration that is to be given is input to main controller 50 via input unit 45 such as a keyboard, and based on such information, main controller 50 makes a Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic that corresponds to the aberration information given when main controller 50 exposed the subject pattern. However, the present invention is not limited to this. That is, the third program may be installed into a different computer for simulation other than main controller 50, and various assumptions may be made on information such as the object pattern and information on the projection optical system. And based on each assumption, input operation may be repeatedly performed to make the Zernike sensitivity table of various types corresponding to the input information in advance, while sequentially changing the

condition setting, as well as the information on the targeted aberration, the information on the projection optical system, and the information on the aberration that is to be given, and from these variation tables a database may be made, which may be stored in the CD-ROM along with the first and second programs.

When the database made up of the Zernike sensitivity table of various types described above is made in advance, a program (hereinafter called "the fourth program" for the sake of convenience) is to be prepared, which is a simplified program of the third program to make the CPU in main controller 50 perform the computation previously described using a corresponding Zernike sensitivity table in response to the input of the measurement results of the wavefront aberration and setting conditions and to make the CPU immediately calculate and display the targeted aberration. The fourth program is to be stored in the above CD-ROM.

Then, on simulation, the first and fourth programs in the CD-ROM are installed on the storage unit 42, and at the same time the database consisting of the Zernike sensitivity table is copied to the storage unit 42. Or, only the first and fourth programs in the CD-ROM may be installed on the storage unit 42 and the CD-ROM may be left in drive unit 46. In the latter case, on simulation, main controller 50 is to read the database of the Zernike sensitivity table from the CD-ROM when necessary. In this case, the CD-ROM set inside drive unit 46 makes up the

storage unit. This can be accomplished, by modifying the software.

In the above embodiment, the case has been described where a wavefront aberration, which is an overall aberration, is measured as the image forming characteristics of the projection optical system, and the target adjustment amount of the movable lenses (specific optical elements for adjustment) for correcting the wavefront aberration is calculated, according to the measurement results. However, the present invention is not limited to this. For example, the image forming characteristics of the projection optical system subject to adjustment may be individual image forming characteristics, such as coma or distortion. In this case, for example, a relationship between the unit quantity adjustment amount of the specific optical elements for adjustment in directions of each degree of freedom and the variation amount of the individual image forming characteristics such as coma or distortion is obtained by simulation, and based on the results, parameters denoting the relationship between the adjustment of the specific optical element and the change in the image forming characteristics of the projection optical system is obtained, and then a database is made by the parameters. Then, when actually adjusting the image forming characteristics of the projection optical system, by obtaining coma (or a line-width abnormal value), distortion, or the like of the projection optical system

using, for example, the exposing method or aerial image measurement method, and inputting the measurement values to the main controller, the target adjustment amount of the specific optical element can be decided by calculation likewise the above embodiment, using a relation equation between the image forming characteristics that has been obtained, the parameters, and the target adjustment amount of the specific optical element (such relation expression is to be prepared in advance).

In addition, in the above embodiment, the case has been described where the wavefront aberration of projection optical system PL is measured using a measurement reticle. The present invention, however, is not limited to this, and the measurement of the wavefront aberration may be performed on body using a portable wavefront aberration measuring unit that is detachable to wafer stage WST. As such a wavefront aberration measuring unit, a wavefront aberration measuring unit 80 based on the Shack-Hartmann method that uses a microlens array in its photodetection optical system may be used, as is shown in Fig. 10.

Details such as the structure of wavefront aberration measuring unit 80 will now be briefly described. As is shown in Fig. 10, wavefront aberration measuring unit 80 comprises a housing 82 whose inner space has an L-shaped cross section in an YZ plane, a photodetection optical system 84, which is composed of a

plurality of optical elements arranged in a predetermined positional relationship in housing 82, and a photodetection portion 86, which is disposed on the +Y side end within housing 82.

5 Housing 82 is made from a member whose cross section in the YZ plane is shaped in the letter L, having a space formed therein, and at its topmost portion (the end portion in the +Z direction), an opening 82a that has a circular shape when in a planar view is formed so that
10 the light from above housing 82 will be guided into the inner space of housing 82. In addition, a cover glass 88 is provided so as to cover opening 82a from the inside of housing 82. On the upper surface of cover glass 88, a light shielding membrane that has a circular opening in
15 the center is formed by vapor deposition of metal such as chrome, which shields unnecessary light from entering photodetection optical system 84 when the wavefront aberration of projection optical system PL is measured.

Photodetection optical system 84 is made up of an
20 objective lens 84a, a relay lens 84b, and a deflecting mirror 84c, which are sequentially arranged from under cover glass 88 inside housing 82 in a downward direction, and a collimator lens 84d and a microlens array 84e, which are sequentially arranged on the +Y side of
25 deflecting mirror 84c. Deflecting mirror 84c is provided having an inclination of 45° , and by deflecting mirror 84c, the optical path of the light entering the objective lens 84a from above in a downward vertical direction is

deflected toward the collimator lens 84d. Each of the optical members that make up photodetection optical system 84 is fixed to the wall of housing 82 on the inner side, via holding members (not shown), respectively.

- 5 Microlens array 84e has a plurality of small convex lenses (lens elements) that are arranged in an array shape on a plane perpendicular to the optical path.

Photodetection portion 86 is made up of parts like a photodetection element such as a two-dimensional CCD,
10 and an electric circuit such as a charge transport controlling circuit. The photodetection element has an area large enough to receive all the beams that have entered objective lens 84a and are outgoing microlens array 84e. The measurement data of photodetection portion
15 86 is output to main controller 50 via a signal line (not shown).

Next, the measuring method of wavefront aberration using wavefront aberration measuring unit 80 will be described. In the following description, for the sake of
20 simplicity, the aberration of photodetection optical system 84 in wavefront aberration measuring unit 80 is to be small enough so that it can be ignored.

First of all, on normal exposure, because wavefront aberration measuring unit 80 is detached from Z tilt
25 stage 58, the operator performs the operation of attaching wavefront aberration measuring unit 80 to the side surface of Z tilt stage 58 when wavefront measurement is performed. On such attachment operation,

wavefront aberration measuring unit 80 is fixed to a predetermined reference surface (in this case, the surface on the +Y side) via bolt or a magnet, so that wavefront aberration measuring unit 80 is within the movement strokes of wafer stage WST (Z tilt stage 58) during wavefront measurement.

After the above attachment has been completed, in response to the command input by the operator to start the measurement, main controller 50 moves wafer stage WST via wafer stage drive portion 56 so that wavefront aberration measuring unit 80 is positioned below the alignment system referred to earlier based on the off-axis method. Then, main controller 50 detects alignment marks (not shown) provided on wavefront aberration measuring unit 80 with the alignment system, and based on the detection results and the measurement values of laser interferometer 54W at that point, calculates the position coordinates of the alignment marks and obtains the accurate position of wavefront aberration measuring unit 80. Then, after the position of the wavefront aberration measuring unit 80 is measured, the wavefront aberration is measured in the following manner, with main controller 50 playing the main role.

First of all, main controller 50 loads a measurement reticle (not shown) on which pinhole patterns are formed (hereinafter referred to as a 'pinhole reticle' in order to distinguish it from measurement reticle R_T previously described) with a reticle loader

(not shown) on reticle stage RST. This measurement reticle has pinholes (which become ideal point light sources that generate spherical waves) formed on its pattern surface at a plurality of points in an area
5 identical to illumination area IAR, and is used only for measurement.

In the pinhole reticle used in this case, for example, a diffusion plate is provided on its upper surface so that the wavefront of the beams passing
10 through all the numerical apertures of projection optical system PL can be obtained, that is, the wavefront aberration covering all the numerical apertures of projection optical system PL are measured.

After the pinhole reticle is loaded, main
15 controller 50 detects reticle alignment marks formed on the pinhole reticle using the reticle alignment microscope described earlier, and based on the detection results, aligns the pinhole reticle at a predetermined position. With this operation, the center of the pinhole
20 reticle is substantially made to coincide with the optical axis of projection optical system PL.

Then, main controller 50 gives control information TS to light source 16 so as to make it start emitting the laser beam. With this operation, illumination light EL
25 from illumination optical system 12 is irradiated on the pinhole reticle. Then, the beams outgoing from the plurality of pinholes on the pinhole reticle are condensed on the image plane via projection optical

system PL, and the images of the pinholes are formed on the image plane.

Next, main controller 50 moves wafer stage WST via wafer stage drive portion 56 so that the substantial
5 center of opening 82a of wavefront aberration measuring unit 80 coincides with an image forming point where an image of a pinhole on the pinhole reticle (hereinafter referred to as 'focused pinhole') is formed, while monitoring the measurement values of wafer laser
10 interferometer 54W. On such operation, based on the detection results of the focal point position detection system previously described, main controller 50 finely moves wafer stage WST in the Z-axis direction via wafer stage drive portion 56 so that the upper surface of cover
15 glass 88 of wavefront-aberration measuring unit 80 coincides with the image plane on which the pinhole images are formed. When wafer stage WST is being finely moved, the angle of inclination is also adjusted if necessary. In this manner, the imaging beam of the
20 focused pinhole enters photodetection optical system 84 via the opening in the center of cover glass 88, and is photodetected by the photodetection elements making up the photodetection portion 86.

More particularly, from the focused pinhole on the
25 pinhole reticle, a spherical wave is generated which becomes parallel beams via projection optical system PL and objective lens 84a, relay lens 84b, mirror 84c, and collimator lens 84d that make up the photodetection

optical system 84 and irradiate microlens array 84e. With this operation, the pupil surface of projection optical system PL is relayed to microlens array 84e, and then divided thereby. And then, by each lens element of
5 microlens array 84e, the respective beams are condensed on the photodetection surface of the photodetection element, and the images of the pinholes are respectively formed on the photodetection surface.

In this case, when projection optical system PL is
10 an ideal optical system that does not have any wavefront aberration, the wavefront in the pupil plane of projection optical system PL becomes an ideal shape (in this case, a planar surface), and as a consequence, the parallel beams incident on microlens array 84e is
15 supposed to be a plane wave that has an ideal wavefront. In this case, as is shown in Fig. 11A, a spot image (hereinafter also referred to as a 'spot') is formed at a position on the optical axis of each lens element that make up microlens array 84e.

20 However, in projection optical system PL, because there normally is wavefront aberration, the wavefront of the parallel beams incident on microlens array 84e shifts from the ideal wavefront, and corresponding to the shift, that is, the inclination of the wavefront with respect to
25 the ideal wavefront, the image forming position of each spot shifts from the position on the optical axis of each lens element of microlens array 84e, as is shown in Fig. 11B. In this case, the positional deviation of each spot

from its reference point (the position on the optical axis of each lens element) corresponds to the inclination of the wavefront.

Then, the light incident on each condensing point on the photodetection element making up photodetection portion 86 (beams of the spot images) is photoelectrically converted at the photodetection elements, and the photoelectric conversion signals are sent to main controller 50 via the electric circuit.

10 Based on the photodetection conversion signals, main controller 50 calculates the image forming position of each spot, and furthermore, calculates the positional deviation ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) using the calculation results and the positional data of the known reference points and stores it in the RAM. On such operation, the measurement values of laser interferometer 54W at that point (X_i , Y_i) are being sent to main controller 50.

When measurement of positional deviation of the spot images by wavefront aberration measuring unit 80 at the image forming point of the focused pinhole image is completed, main controller 50 moves wafer stage WST so that the substantial center of opening 82a of wavefront aberration measuring unit 80 coincides with the image forming point of the next pinhole image. When this movement is completed, main controller 50 makes light source 16 generate the laser beam as is described above, and similarly calculates the image forming position of each spot. Hereinafter, a similar measurement is

sequentially performed at the image forming point of other pinhole images.

When all the necessary measurement has been completed, in the RAM of main controller 50, data on the positional deviation ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) of each pinhole image at the image forming point previously described and the coordinate data of each image forming point (the measurement values of laser interferometer 54W (X_i , Y_i) when performing measurement the image forming point of each pinhole image) are stored.

Then, main controller 50 calculates the wavefront data (the coefficients of each term of the Zernike polynomial), based on the positional deviation ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) of the image forming points of the pinhole images stored in the RAM that corresponds to the inclination of the wavefront on the pupil surface of projection optical system PL, using a different conversion program similar to the first program, which was previously described. The reason for stating 'similar to the first program' is because, when wavefront aberration measuring unit 80 described earlier is used, a program different from the first program is normally prepared that converts the positional deviation amount of the image forming point of the spot images that are measured into coefficients of each term of the Zernike polynomial.

As is obvious from the description so far, when the wavefront aberration is measured using wavefront aberration measuring unit 80, wafer development or the

like will not be required, therefore, reduction of the measurement time can be expected. In addition, because wafer development or the like will not be required, there is also an advantage of exposure apparatus 10 being able to perform a so-called self-measurement in a state where wavefront aberration measuring unit 80 is attached to wafer stage WST. Then, by performing a process according to a procedure similar to the above embodiment, main controller 50 can calculate and display the targeted aberration (image forming characteristics), and furthermore, automatically perform adjustment of the image forming characteristic of projection optical system PL.

In the above embodiment, the case has been described where the first program, which converts the positional deviation amount measured using measurement reticle R_T into coefficients of each term of the Zernike polynomial, the second program, which computes the adjustment amount of the image forming characteristics based on the coefficients of each term of the Zernike polynomial that were converted in the first program, the third program, which converts the coefficients of each term of the Zernike polynomial converted in the first program into various aberrations (including index of such aberrations), and the database that goes with the second program, are all packaged in a single CD-ROM. Such a packaging, however, is not a mandatory. That is, the first program, the second program (and its database), and

the third program are programs that have different purposes, which means that they all have sufficient utility values independently.

Especially with the third program, a part of it
5 that makes the Zernike sensitivity table (corresponding to steps 101 through 122) can be used as a single program. By inputting various types of information including information on a subject pattern, information of the targeted image forming characteristic, information on the
10 projection optical system, and information on a given aberration from an input unit such as a keyboard into a computer that has such a program installed, the Zernike sensitivity table of the targeted image forming characteristic is made. Accordingly, the database
15 consisting of the Zernike sensitivity table made in the manner above can be suitably used in other exposure apparatus as is previously described.

For example, when the wavefront aberration measuring unit referred to earlier is used, a program
20 different from the first program is normally prepared that converts the positional deviation amount of the image forming point of the spot images that are measured into coefficients of each term of the Zernike polynomial, and even when the second program and its database, and
25 the third program are combined with such a conversion program, it is obvious that the second program and its database, and the third program can sufficiently show their capability.

In addition, especially with the second program and the third program, they do not necessarily have to be combined because their purposes differ greatly. The purpose of the former is to make the operation efficient for a service technician or the like performing repair and adjustment on the exposure apparatus the image forming characteristics of the projection optical system need to be adjusted, whereas, the purpose of the latter is to perform a simulation to confirm whether the targeted image forming characteristic of the projection optical system is sufficient enough when the operator or the like of the exposure apparatus in a semiconductor manufacturing site exposes a subject pattern. When taking into consideration such differences in their purposes, in the case the second program and its database and the third program are in the same software package as in the above embodiment, for example, two types of passwords is settable. In such a case, the second and third program may be supplied as a different information storage medium such as a firmware, and only the database may be recorded in a storage medium such as the CD-ROM.

In addition, in the above embodiment, on the adjustment of the image forming characteristic of projection optical system PL, the first to third program was installed on storage unit 42 from the CD-ROM, and the database was copied to storage unit 42. The present invention, however, is not limited to this, and so long as only the first to third programs are installed on

storage unit 42 from the CD-ROM, the database does not have to be copied to storage unit 42. In this case, the CD-ROM set in the drive unit structures the storage unit.

In the above embodiment, the case has been described where the database is made up of parameters corresponding to the unit drive amount of movable lenses 13₁ to 13₄ in directions of each degree of freedom. However, the present invention is not limited to this, and in cases such as when a part of the lens making up projection optical system PL can be easily exchanged, parameters that show the change of the image forming characteristics corresponding to the thickness of the lens may be included. In such a case, the optimal lens thickness is to be calculated as the target adjustment amount. Besides such parameters, the database may include parameters that show the change of the image forming characteristics corresponding to the reticle rotation. In this case, for example, when reticle R rotates as is shown in Fig. 2F, such rotation may be in a + (positive) direction, and the unit rotation amount may be 0.1 degrees. In this case, according to the calculated reticle rotation, for example, only at least one of reticle stage RST and wafer stage WST has to be rotated. And, other than such parameters, details whose change affects the image forming characteristics of the projection optical system and is also adjustable can also be included in the database, such as center wavelength of the illumination light, or the position of the reticle or

the like in the optical axis direction.

In addition, in the above embodiment, the case has been described where main controller 50 automatically adjusts the image forming characteristics of the projection optical system PL via image forming characteristics correction controller 48, based on the target adjustment amount of the specific optical elements computed according to the second program or the targeted aberration amounts computed according to the third program. However, the present invention is not limited to this, and the image forming characteristic of projection optical system PL may be adjusted manually by an operator or via an operation. In such a case, the second program or the third program can be effectively used not only in the adjustment stage, but also in the manufacturing stage, which allows production of a projection optical system whose image forming characteristics are adjusted.

In the above embodiment, the case has been described where reference patterns are provided on measurement reticle R_T along with measurement patterns, however, the reference patterns do not have to be provided on the measurement reticle masks (measurement reticle R_T in the case of the above embodiment) for measuring optical properties. That is, the reference patterns may be provided on a different mask, or the reference patterns may not be provided on the mask side but be provided on the substrate (wafer) side instead. More particularly, a reference wafer on which the

reference patterns are formed in advance in a size corresponding to the projection magnification can be used, and by coating a resist on the reference wafer, transferring the measurement patterns on the resist layer, and developing the patterns, and then by measuring the positional deviating between the resist image of the measurement pattern that can be obtained after development and the reference marks, substantially the same measurement as in the above embodiment can be performed.

In addition, in the above embodiment, after the measurement pattern and the reference pattern has been transferred onto wafer W, the wavefront aberration of projection optical system PL was calculated based on the measurement results of the resist image that was obtained by developing the wafer. The present invention, however, is not limited to this, and the projection image (aerial image) or the measurement pattern can be projected on the wafer and the projected image (aerial image) may be measured using an aerial image measuring unit, or the latent images of the measurement patterns and the reference patterns formed on the resist layer or images that are obtained by wafer etching may be measured. In such cases, as long as the positional deviation of the measurement patterns from the reference position (such as the designed projection position of the measurement pattern) are measured, the wavefront aberration of the projection optical system can be measured in the

procedure similar to the above embodiment based on the measurement results. Also, instead of transferring the measurement pattern onto the wafer, a reference wafer on which the reference pattern is already formed may be prepared in advance, and the reference pattern may be transferred onto its resist layer and the positional deviation measured, or an aerial image measuring unit that has a plurality of apertures corresponding to the measurement patterns may be used to measure the positional deviation between the apertures and the reference pattern. Furthermore, in the above embodiment, the positional deviation previously described was measured using an overlay measuring unit, however, other units may be used, such as for example, an alignment sensor provided in the exposure apparatus.

In addition, in the above embodiment, the coefficients of the terms of the Zernike polynomial were used up to the 37th term, however, the 38th term and higher terms may be used, such as using the terms up to the 81st term so that the high order component of each aberration of projection optical system PL may be calculated. That is, the number of terms or the numbers used in the Zernike polynomial may be any number. Furthermore, because the aberration of projection optical system PL may be positively generated depending on the illumination conditions or the like, in the above embodiment, the optical elements of projection optical system PL may be adjusted so that the targeted aberration becomes a

predetermined value, in addition to the targeted aberration being either zero or a minimal quantity at all times.

Furthermore, in the above embodiment, a service technician performed the installation of the programs previously described. However, for example, the programs may be installed in a server connected through the Internet or the like to a host computer that totally controls manufacturing equipment such as exposure apparatus or a manufacturing line including a large number of manufacturing equipment, or the programs may be installed in the exposure apparatus. In this case, the operator may enter the pattern information, or the exposure apparatus may be made to obtain the pattern information by reading a bar code or a two dimensional code of a reticle on which the pattern to be transferred onto a wafer is formed, so that the exposure apparatus or the server can automatically perform the making of the Zernike sensitivity table described earlier, deciding the optimum exposure condition (conditions such as illumination condition and the numerical apertures of projection optical system PL), and adjusting the image forming characteristic of projection optical system PL, without any intervening by the operator or the service technician. On such automation, when, for example, the measurement reticle described earlier is used when measuring the wavefront aberration, the alignment system of the exposure apparatus may detect the positional

deviation of the latent images of the measurement pattern formed on a resist layer of a wafer from the latent images of the reference pattern. In addition, in the above embodiment, the operator or the like fixed
5 wavefront aberration measuring unit 80 to wafer stage WST, however, for example, a carriage system (such as a wafer loader) that performs wafer or wafer holder exchange may be used to automatically carry wavefront aberration measuring unit 80.

10 In the above embodiment, the case has been described where the present invention has been applied to a stepper, however, the present invention is not limited to this, and the present invention can also be suitably applied to a scanning type exposure apparatus like the
15 one disclosed in, for example, United States Patent No. 5,473,410 that transfers a pattern of a mask onto a substrate while synchronously moving the mask and the substrate.

The use of the exposure apparatus is not limited
20 only to the exposure apparatus for manufacturing semiconductor devices, but the present invention can also be widely applied to an exposure apparatus for transferring a liquid crystal display device pattern onto a rectangular glass plate and an exposure apparatus for
25 producing thin-film magnetic heads, micromachines, DNA chips, and the like. Furthermore, the present invention can be applied not only to an exposure apparatus for producing microdevices such as semiconductor devices, but

can also be applied to an exposure apparatus that transfers a circuit pattern onto a glass plate or silicon wafer to produce a mask or reticle used in a light exposure apparatus, an EUV exposure apparatus, an X-ray exposure apparatus, an electron-beam exposure apparatus, and the like.

In addition, the light source of the exposure apparatus in the above embodiment is not limited to an ultraviolet pulse light source such as an F₂ laser, an ArF excimer laser, or a KrF excimer laser, and an ultra-high pressure mercury lamp emitting an emission line such as g-line (a wavelength of 436nm) or i-line (a wavelength of 365nm) can also be used.

In addition, a harmonic wave may be used that is obtained by amplifying a single-wavelength laser beam in the infrared or visible range emitted by a DFB semiconductor laser or fiber laser, with a fiber amplifier doped with, for example, erbium (or both erbium and ytterbium), and by converting the wavelength into ultraviolet light using a nonlinear optical crystal. Also, the magnification of the projection optical system is not limited to a reduction system, and an equal magnification or a magnifying system may be used. Furthermore, the projection optical system is not limited to a refraction system, and a catadioptric system that has reflection optical elements and refraction optical elements may be used as well as a reflection system that uses only reflection optical elements. When the catadioptric system

or the reflection system is used as projection optical system PL, the image forming characteristics of the projection optical system are adjusted by changing the position or the like of the reflection optical elements (such as a concave mirror or a reflection mirror) that serve as the specific optical elements previously described. In addition, when the F_2 laser beam, the Ar_2 laser beam, the EUV light, or the like is used as illumination light EL, projection optical system PL can be a total reflection system that has only reflection optical elements. However, when the Ar_2 laser beam, the EUV light, or the like is used, reticle R also needs to be a reflective type reticle.

Incidentally, semiconductor devices are made undergoing the following steps: a device function/performance designing step, a reticle making step where a reticle is made based on the designing step, a wafer making step where a wafer is made from silicon material, a transferring step where the pattern of the reticle is transferred onto the wafer by the exposure apparatus in the embodiment, a device assembly step (including the dicing process, bonding process, and packaging process), and an inspection step. According to the device manufacturing method, because exposure is performed in a lithographic process using the exposure apparatus in the above embodiment, the pattern of reticle R is transferred onto wafer W via projection optical system PL whose image forming characteristics are

adjusted according to a subject pattern, or whose image forming characteristics are adjusted with high precision based on the measurement results of the wavefront aberration, and therefore it is possible to transfer the detailed pattern onto wafer W with high overlay accuracy. Accordingly, the yield of the devices as final products is improved, which makes it possible to improve its productivity.

10 **INDUSTRIAL APPLICABILITY**

As is described above, the image forming characteristics measuring method of the present invention is suitable to measure the targeted image forming characteristic of a projection optical system. Also, the image forming characteristics adjusting method of the present invention is suitable to adjust the image forming characteristics of a projection optical system. Also, the exposure method of the present invention is suitable to form fine patterns on a substrate. Also, the exposure apparatus of the present invention is suitable to perform exposure with the image forming characteristics of its projection optical system adjusted accurately. Also, the programs and storage medium of the present invention are suitable for use in the above exposure apparatus.

Furthermore, the device manufacturing method of the present invention is suitable to manufacture microdevices.

WHAT IS CLAIMED IS:

1. An image forming characteristics measuring method in which at least one image forming characteristic of a projection optical system is measured, said method
5 of a projection optical system is measured, said method comprising:

a measuring process in which wavefront aberration of said projection optical system is measured at one measurement point at the least in a field of said
10 projection optical system; and

a calculating process in which at least one targeted image forming characteristic is calculated, based on said measuring of wavefront aberration and a Zernike sensitivity table of said targeted image forming
15 characteristic that is prepared in advance.

2. The image forming characteristics measuring method according to Claim 1 wherein

in said calculating process, when said targeted
20 image forming characteristic include image forming characteristics of a plurality of types, said image forming characteristics of a plurality of types included in said targeted image forming characteristic are each calculated, based on said measuring of wavefront
25 aberration and a Zernike sensitivity table for each of said image forming characteristics of a plurality of types.

3. The image forming characteristics measuring method according to Claim 1, said method further comprising:

5 a making process in which conditions are set in order to make a Zernike sensitivity table, based on information on a pattern subject to projection by said projection optical system and said targeted image forming characteristic, and a Zernike sensitivity table of said targeted image forming characteristic that corresponds to
10 information related to a given aberration is made, based on information related to said projection optical system and information related to said given aberration, prior to said measuring process.

15 4. The image forming characteristics measuring method according to Claim 3 wherein

said information related to said projection optical system includes numerical aperture of said projection optical system, illumination condition, and wavelength of
20 illumination light.

5. The image forming characteristics measuring method according to Claim 3 wherein

in said making process, when said targeted image
25 forming characteristic include image forming characteristics of a plurality of types, a Zernike sensitivity table for each of said image forming characteristics of a plurality of types that correspond

to said information related to aberration is made.

6. The image forming characteristics measuring method according to Claim 1, further comprising:

5 a displaying process in which information related to said targeted image forming characteristic that has been calculated is displayed.

7. An image forming characteristics adjusting method in which at least one image forming characteristic of a projection optical system is adjusted, said method comprising:

10 a measuring process in which at least one targeted image forming characteristic is measured using said image forming characteristics measuring method according to
15 Claim 1; and

 an adjusting process in which said projection optical system is adjusted based on results of said measuring of said targeted image forming characteristic.

20

8. The image forming characteristics adjusting method according to Claim 7 wherein

 said projection optical system is structured comprising a plurality of optical elements that include a
25 specific optical element used for adjustment, and

 adjustment of said projection optical system is performed by deciding a targeted adjustment amount of said specific optical element by computation using a

relation expression between said image forming characteristic that has been measured, parameters, and a targeted adjustment amount of said specific optical element, and by adjusting said specific optical element
5 for adjustment according to said decided targeted adjustment amount, said parameters denoting a relation between adjustment of said specific optical element and a change in image forming characteristics of said projection optical system.

10

9. An image forming characteristics adjusting method in which at least one image forming characteristic of a projection optical system comprising a plurality of optical elements that include a specific optical element
15 used for adjustment is adjusted, said method comprising:

an obtaining process in which at least one image forming characteristic of said projection optical system is obtained, by obtaining information on light via said projection optical system at one measurement point at the
20 least in a field of said projection optical system; and

a deciding process in which a targeted adjustment amount of said specific optical element is decided by computation using a relation expression between said image forming characteristic that has been obtained,
25 parameters, and a targeted adjustment amount of said specific optical element, said parameters denoting a relation between adjustment of said specific optical element and a change in image forming characteristics of

said projection optical system.

10. The image forming characteristics adjusting method according to Claim 9, said method further comprising:

an obtaining process in which said parameters are obtained, prior to said obtaining process in which said image forming characteristic is obtained.

11. The image forming characteristics adjusting method according to Claim 9 wherein

in said obtaining process in which said image forming characteristic is obtained, image forming characteristics of a plurality of types are obtained, and

15 in said deciding process, a target adjustment amount of said specific optical element is decided by computation using a relation expression between said image forming characteristics of a plurality of types that have been obtained, parameters, and a targeted adjustment amount of said specific optical element, said
20 parameters denoting a relation between adjustment of said specific optical element and a change in image forming characteristics of said projection optical system.

25 12. The image forming characteristics adjusting method according to Claim 9 wherein said image forming characteristic is a wavefront aberration expressed in a Zernike polynomial.

13. The image forming characteristics adjusting method according to Claim 12 wherein

5 said relation expression is an equation that includes a weighting function that performs weighting on a coefficient of any term in coefficients of each term of said Zernike polynomial.

14. An exposure method in which a pattern formed on
10 a mask is transferred onto a substrate via a projection optical system, said exposure method comprising:

 an adjusting process in which at least one image forming characteristic of said projection optical system is adjusted using said image forming characteristics
15 adjusting method according to any one of Claims 7 to 13; and

 a transferring process in which said pattern is transferred onto said substrate using said projection optical system whose image forming characteristic is
20 adjusted.

15. An exposure apparatus that transfers a pattern formed on a mask onto a substrate via a projection optical system, said exposure apparatus comprising:

25 a measuring unit that measures wavefront aberration of said projection optical system, said measuring unit being at least partly attachable to an exposure apparatus main body including said projection optical system; and

a first computing unit that calculates at least one targeted image forming characteristic based on wavefront aberration of said projection optical system measured by said measuring unit and a Zernike sensitivity table of
5 said targeted image forming characteristic.

16. The exposure apparatus according to Claim 15, further comprising:

a storage unit that stores said Zernike sensitivity
10 table in advance.

17. The exposure apparatus according to Claim 15 wherein

said Zernike sensitivity table is a Zernike
15 sensitivity table of said targeted image forming characteristic that corresponds to information on a given aberration on exposure of a subject pattern.

18. The exposure apparatus according to Claim 17,
20 further comprising:

an input unit used to input information of various types including information on said subject pattern, information on said targeted image forming characteristic, information related to said projection optical system,
25 and information on said given aberration; and

a second computing unit that set conditions in order to make a Zernike sensitivity table based on said information on said subject pattern and said targeted

image forming characteristic input via said input unit,
and based on information related to said projection
optical system and information related to said given
aberration input via said input unit, said second

5 computing unit makes a Zernike sensitivity table of said
targeted image forming characteristic that corresponds to
information on said given aberration on exposure of said
subject pattern.

10 19. The exposure apparatus according to Claim 18
wherein

 said information related to said projection optical
system includes numerical aperture of said projection
optical system, illumination condition, and wavelength of
15 illumination light.

 20. The exposure apparatus according to Claim 15,
further comprising:

 a display unit which displays information on said
20 targeted image forming characteristic calculated by said
first computing unit on screen.

 21. The exposure apparatus according to Claim 15,
further comprising:

25 an image forming characteristics correcting unit
that corrects at least one image forming characteristic
of said projection optical system based on calculation
results of said targeted image forming characteristic by

said first computing unit.

22. The exposure apparatus according to Claim 21 wherein

5 said projection optical system is structured comprising a plurality of optical elements that include a specific optical element used for adjustment, and
 said image forming characteristics correcting unit has a storage unit in which parameters are stored in
10 advance that denotes a relation between adjustment of said specific optical element and a change in image forming characteristics of said projection optical system, and a calculation unit that calculates a targeted adjustment amount of said specific optical element using
15 a relation expression between information on said image forming characteristic that has been calculated, said parameters, and a targeted adjustment amount of said specific optical element.

20 23. An exposure apparatus that transfers a pattern formed on a mask onto a substrate via a projection optical system, said exposure apparatus comprising:

 said projection optical system that comprises a plurality of optical elements including a specific
25 optical element used for adjustment;

 a storage unit in which parameters are stored in advance that denotes a relation between adjustment of said specific optical element and a change in image

forming characteristics of said projection optical system,
a measuring unit that measures at least one image
forming characteristic of said projection optical system,
said measuring unit being at least partly attachable to
5 an exposure apparatus main body including said projection
optical system; and

a computing unit that calculates a targeted
adjustment amount of said specific optical element using
a relation expression between an actual measurement data
10 measured by said measuring unit, said parameters, and a
targeted adjustment amount of said specific optical
element.

24. The exposure apparatus according to Claim 23,
15 further comprising:

an image forming characteristics adjusting unit
that adjusts at least one image forming characteristic of
said projection optical system by adjusting said specific
optical element according to said calculated targeted
20 adjustment amount.

25. The exposure apparatus according to Claim 23
wherein

said measuring unit can measure image forming
25 characteristics of a plurality of types of said
projection optical system, and

said computing unit calculates a targeted
adjustment amount of said specific optical element using

a relation expression between an actual measurement data of said image forming characteristics of a plurality of types measured by said measuring unit, said parameters, and a targeted adjustment amount of said specific optical
5 element.

26. The exposure apparatus according to Claim 23 wherein said image forming characteristic is a wavefront aberration expressed in a Zernike polynomial.
10

27. The exposure apparatus according to Claim 26 wherein said relation expression is an equation that includes a weighting function that performs weighting on a coefficient of any term in coefficients of each term of
15 said Zernike polynomial.

28. A device manufacturing method including a lithographic process, wherein in said lithographic process exposure is performed using said exposure
20 apparatus according to any one of Claims 15 to 27.

29. A program that makes a control computer of an exposure apparatus that transfers a pattern of a mask onto a substrate via a projection optical system execute
25 a predetermined process, said program making said control computer execute:

a condition setting procedure in which conditions are set for making a Zernike sensitivity table in

response to an input of information related to information on a subject pattern and information on a targeted image forming characteristic; and

5 a making procedure in which a Zernike sensitivity table of said targeted image forming characteristic corresponding to information on given aberration on exposure of said subject pattern is made, in response to an input of information related to said projection optical system and information on said given aberration.

10

30. The program according to Claim 29, said program further making said control computer execute:

15 a calculating procedure in which said targeted image forming characteristic of said projection optical system is calculated in response to an input of actual measurement data of wavefront aberration of said projection optical system, based on said actual measurement data and said Zernike sensitivity table.

20

31. The program according to Claim 30, said program further making said control computer execute:

a displaying procedure in which information on said targeted image forming characteristic that has been calculated is displayed on a display unit.

25

32. A program according to Claim 30, said program further making said control computer execute:

an adjusting procedure in which said projection

optical system is adjusted so that said targeted image forming characteristic that has been calculated becomes optimal.

5 33. A program according to Claim 30, said program further making said control computer execute:

 a making procedure in which said Zernike sensitivity table is made in response to input of different information related to said projection optical system and input of information on said given aberration, 10 by each different information related to said projection optical system;

 a calculating procedure in which said targeted image forming characteristic of said projection optical system is calculated by each different information 15 related to said projection optical system in response to input of actual measurement data of wavefront aberration of said projection optical system, based on said actual measurement data and said Zernike sensitivity table; and

20 a deciding procedure in which an optimum exposure condition is decided by finding information related to said projection optical system that makes said targeted image forming characteristic that has been calculated become optimal.

25

 34. The program according to Claim 33, said program further making said control computer execute:

 a setting procedure in which said optimum exposure

condition that has been decided is set.

35. A program that makes a control computer execute a process, said program making said control computer
5 execute:

a procedure of calculating a targeted image forming characteristic of a projection optical system in response to an input of information related to said targeted image forming characteristic and an input of actual measurement
10 data of wavefront aberration of said projection optical system, based on said actual measurement data and a Zernike sensitivity table of said targeted image forming characteristic that is prepared in advance.

15 36. The program according to Claim 35, said program further making said control computer execute:

a displaying procedure in which information on said targeted image forming characteristic that has been calculated is displayed on a display unit.

20

37. The program according to Claim 35, said program further making said control computer execute:

an adjusting procedure in which said projection optical system is adjusted so that said targeted image
25 forming characteristic that has been calculated becomes optimal.

38. A program that makes a control computer of an

exposure apparatus that transfers a pattern of a mask onto a substrate via a projection optical system execute a predetermined process, said program making said control computer execute:

5 a calculating procedure in which a targeted adjustment amount of said projection optical system is calculated in response to an input of actual measurement data of image forming characteristics of said projection optical system, using a relation expression between said
10 actual measurement data of image forming characteristics that has been input, parameters, and a targeted adjustment amount of said projection optical system, said parameters denoting a relation between adjustment of said projection optical system and a change in image forming
15 characteristics of said projection optical system.

39. The program according to Claim 38, said program further making said control computer execute:

20 a displaying procedure in which information on said targeted adjustment amount that has been calculated is displayed on a display unit.

40. The program according to Claim 38, said program further making said control computer execute:

25 an adjusting procedure in which said projection optical system is adjusted based on said target adjustment amount that has been calculated.

41. The program according to Claim 38 wherein
said parameters are parameters denoting a relation
between adjustment of a specific optical element used for
adjustment that structures said projection optical system
5 and a change in said image forming characteristics, and
said targeted adjustment amount is an amount of
said specific optical element that needs to be adjusted.

42. The program according to Claim 38 wherein said
10 image forming characteristic is a wavefront aberration
expressed in a Zernike polynomial.

43. The program according to Claim 42 wherein said
relation expression is an equation that includes a
15 weighting function that performs weighting on a
coefficient of any term in coefficients of each term of
said Zernike polynomial.

44. The program according to Claim 38, said program
20 further making said control computer execute:

a condition setting procedure in which conditions
are set for making a Zernike sensitivity table in
response to an input of information related to
information on a subject pattern and an input of

25 information on a targeted image forming characteristic;

a making procedure in which a Zernike sensitivity
table of said targeted image forming characteristic
corresponding to information on aberration is made, in

response to an input of information related to said projection optical system and information on a given aberration; and

5 a calculating procedure in which said targeted image forming characteristic is calculated in response to an input of actual measurement data of wavefront aberration of said projection optical system, based on said measurement data and said Zernike sensitivity table.

10 45. A program according to Claim 44, said program further making said control computer execute:

a displaying procedure in which information on said targeted image forming characteristic that has been calculated is displayed on a display unit.

15

46. A program according to Claim 44, said program further making said control computer execute:

20 a converting procedure in which information obtained on light via said projection optical system at one measurement point at the least in a field of said projection optical system is converted into actual measurement data of said wavefront aberration of said projection optical system.

25 47. An information storage medium that can be read by a computer in which a program according to any one of claims 29 to 46 is recorded.

48. A making method of an exposure apparatus that transfers a pattern of a mask onto a substrate via a projection optical system, said making method comprising:

an adjusting process in which said projection
5 optical system is adjusted using said image forming
characteristics adjusting method according to any one of
claims 7 to 13.

ABSTRACT

When actual measurement data of a wavefront aberration of a projection optical system (PL) is input, a main controller (50) calculates a targeted image forming characteristic of the projection optical system based on the data and a Zernike sensitivity table of the image forming characteristic that is made prior to the input. By using the Zernike sensitivity table, the targeted image forming characteristic can be calculated with only one measurement of wavefront aberration. Moreover, parameters that denote a relation between an adjustment of an adjustable specific optical element (13₁ to 13₄) and a change in the image forming characteristics of the projection optical system is obtained in advance, and are stored in advance in a storage unit (42). Then, when the measurement data of the image forming characteristic of the projection optical system is input, the main controller calculates a targeted adjustment amount of the specific optical element using a relation expression between the measurement data, the parameters, and the targeted adjustment amount of the specific optical element, and adjusts the specific optical element based on the calculation results.

Fig. 1

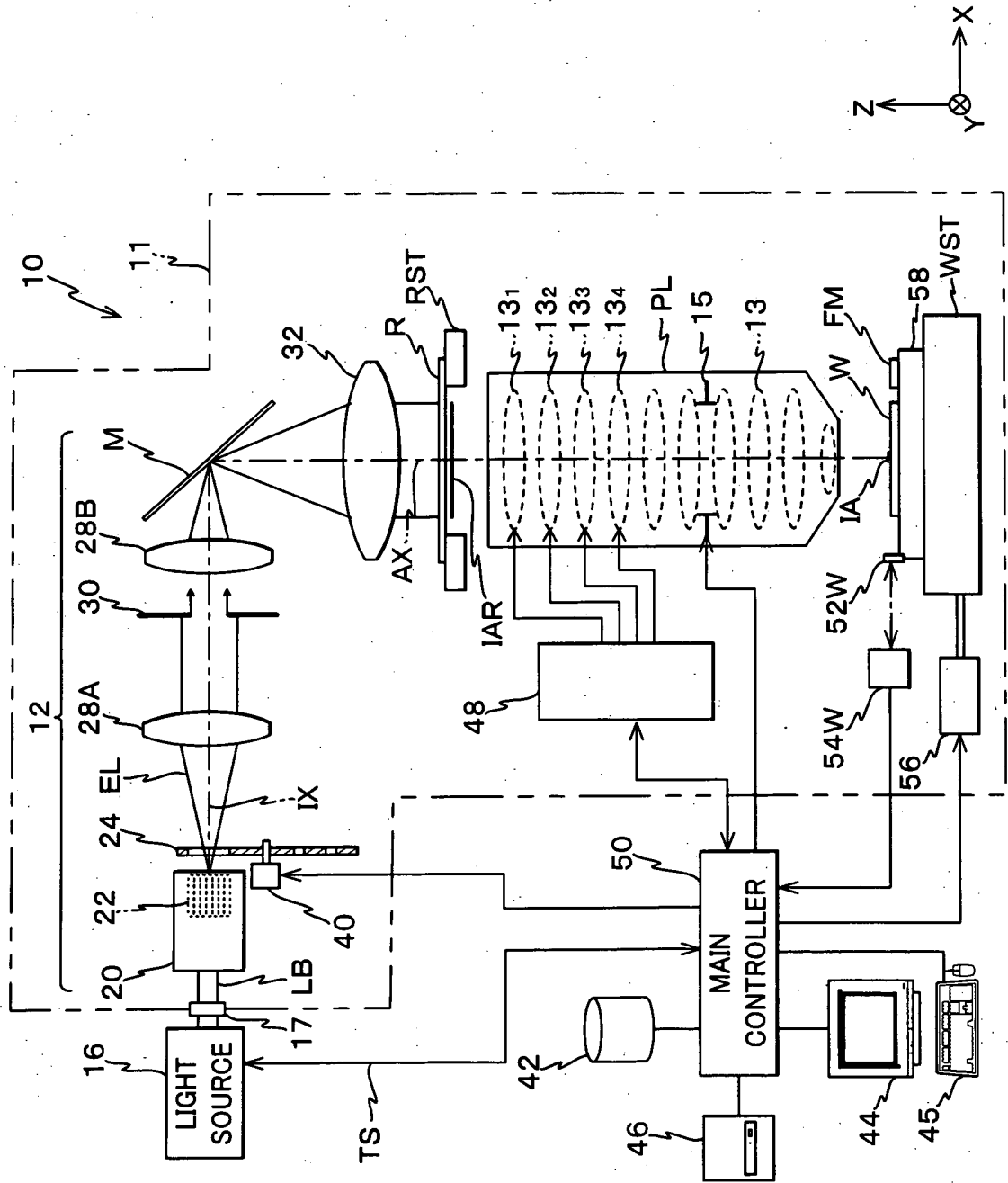


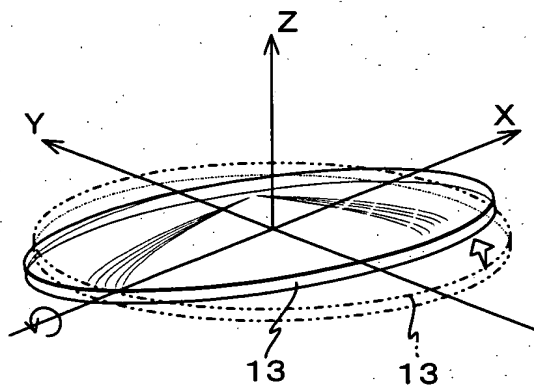
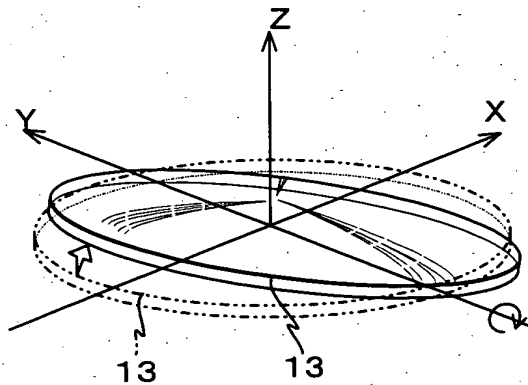
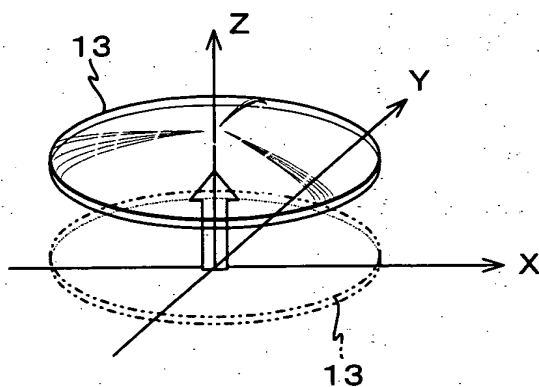
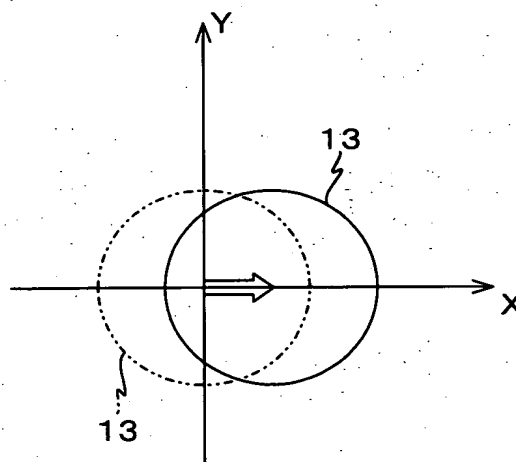
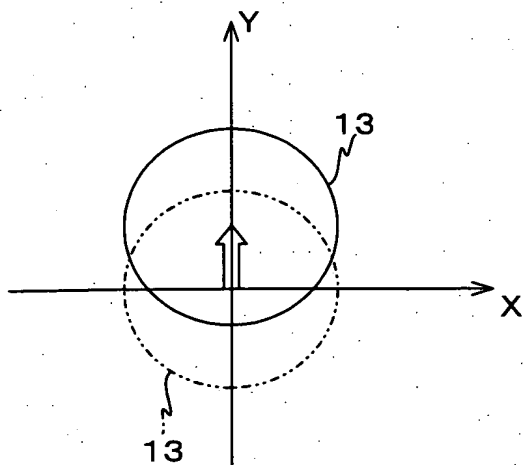
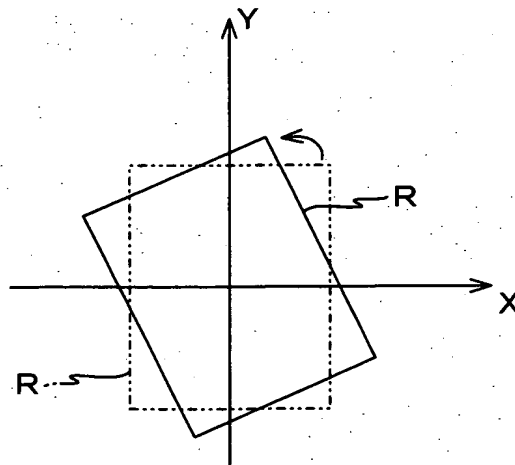
Fig. 2A*Fig. 2B**Fig. 2C**Fig. 2D**Fig. 2E**Fig. 2F*

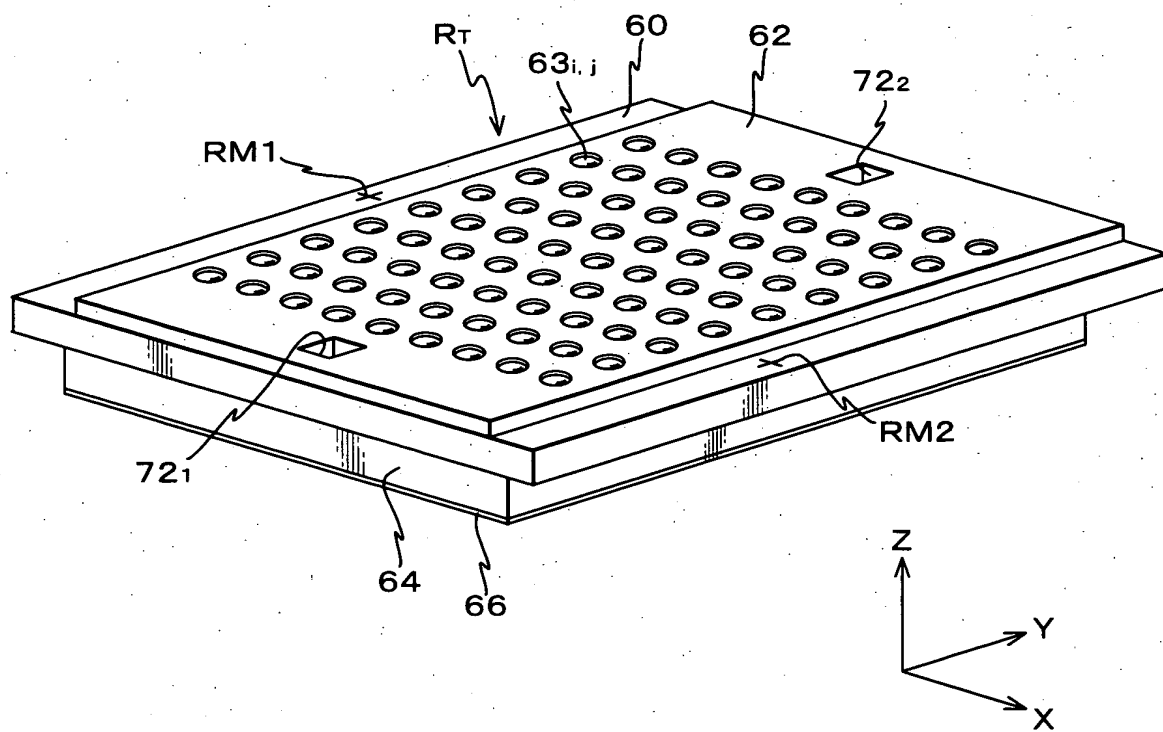
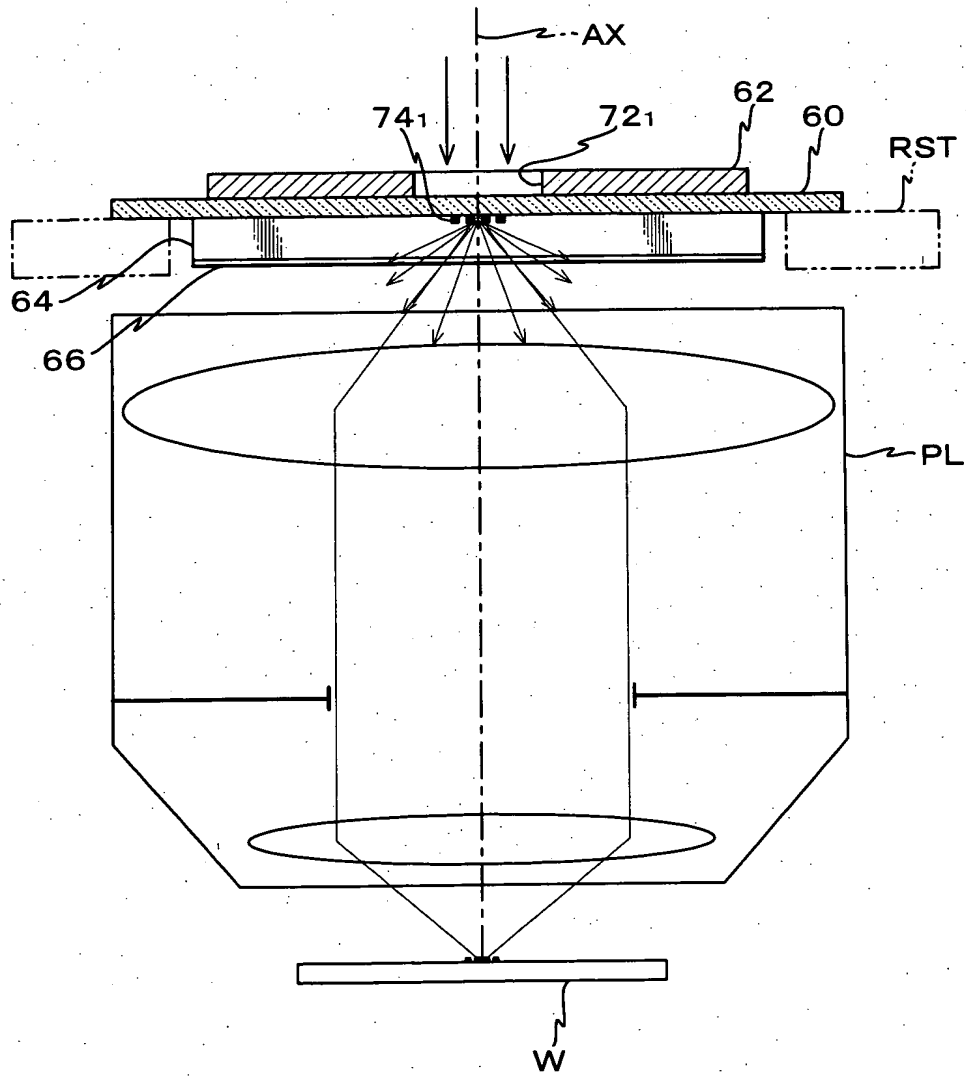
Fig. 3

Fig. 5

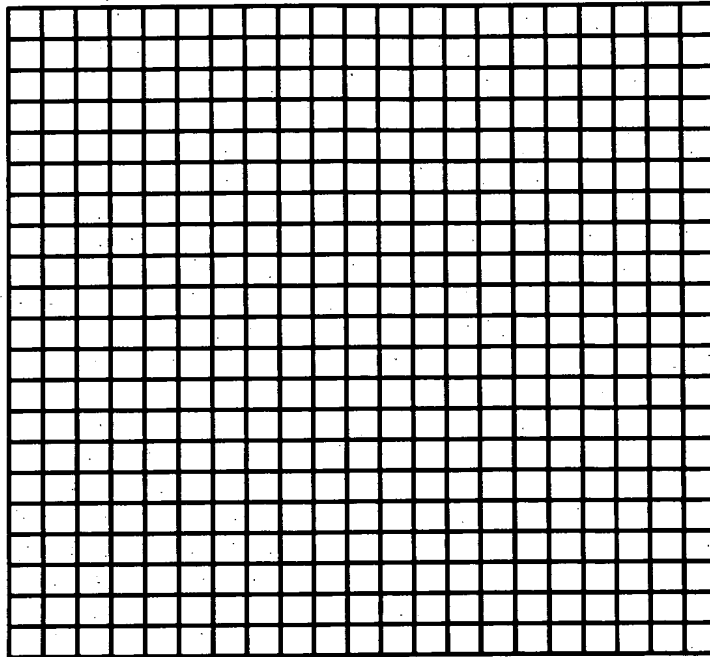
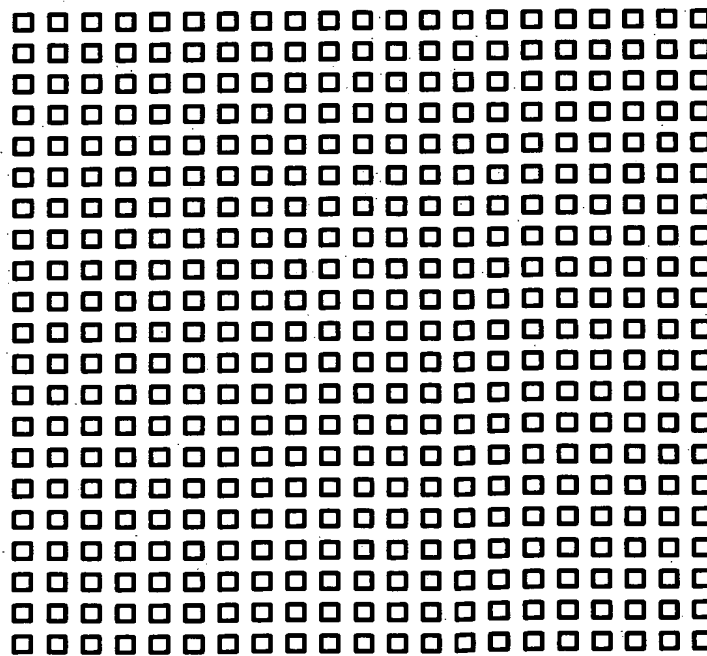
*Fig. 6A*67_{i,j}*Fig. 6B*74₁(74₂)

Fig. 7

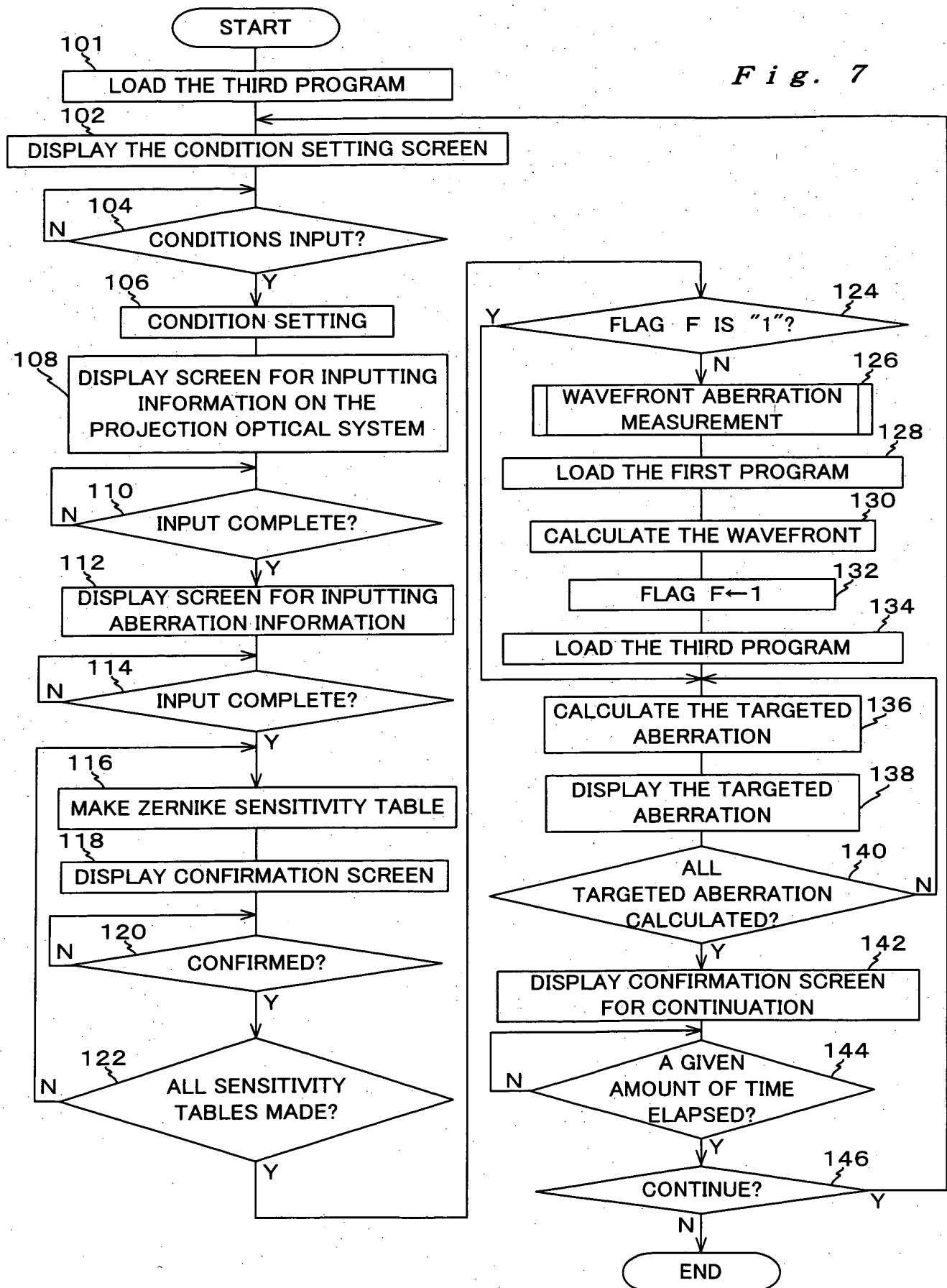


Fig. 8

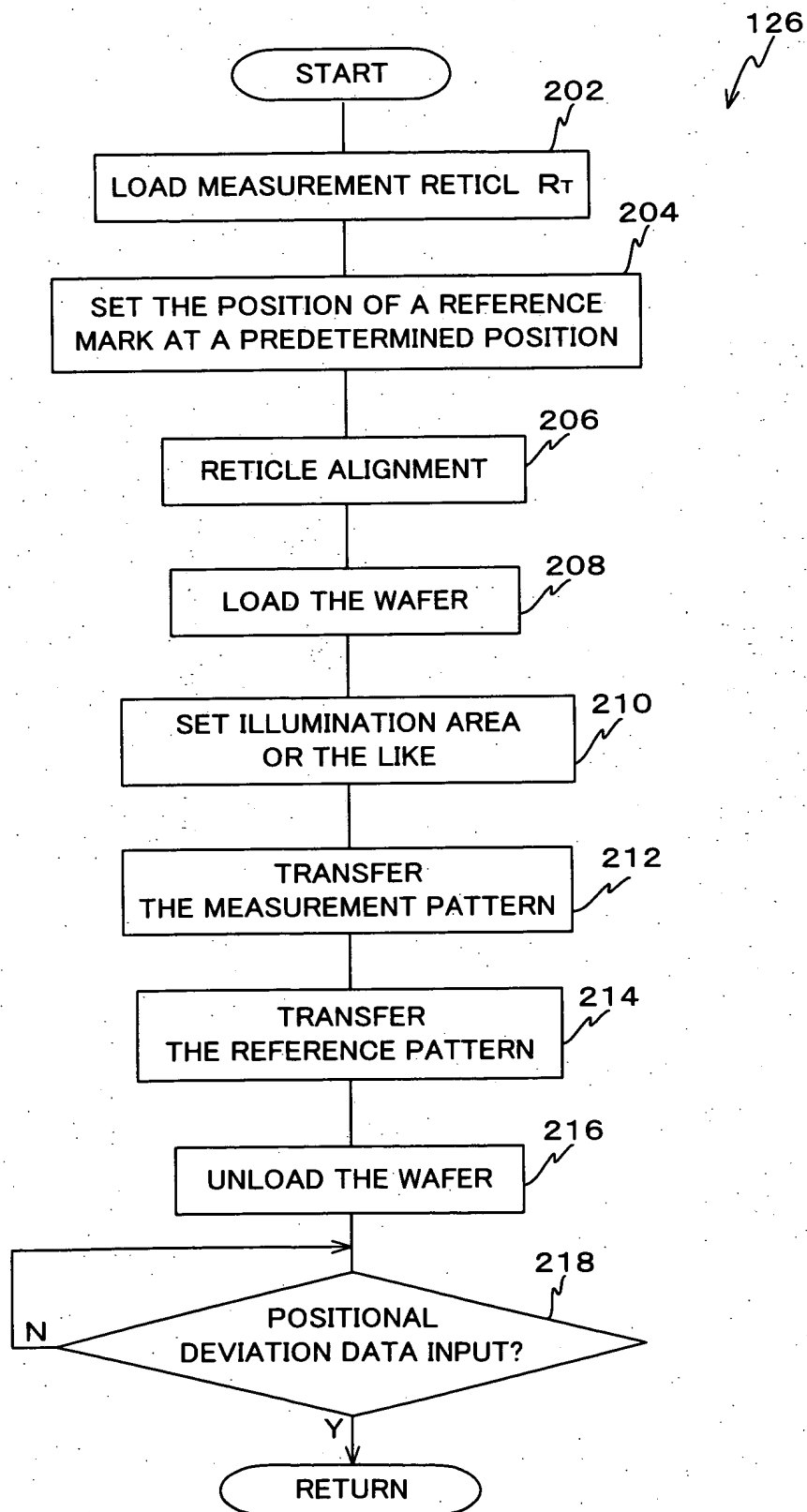


Fig. 9A

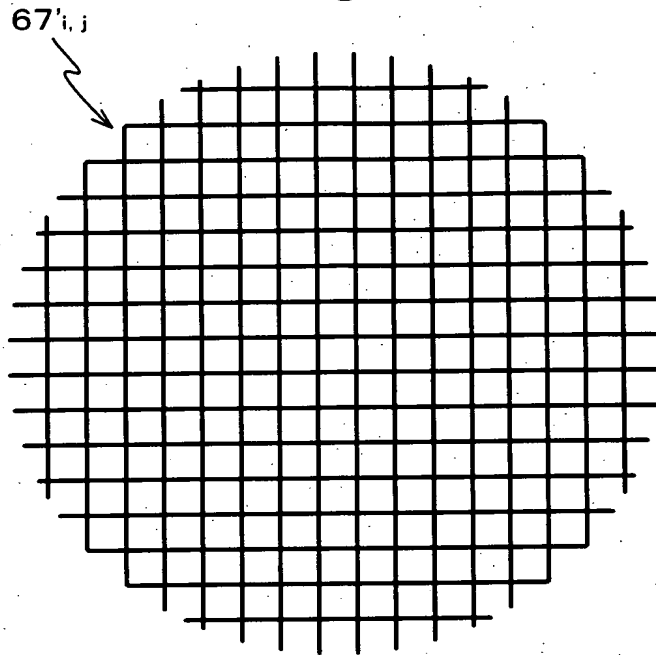


Fig. 9B

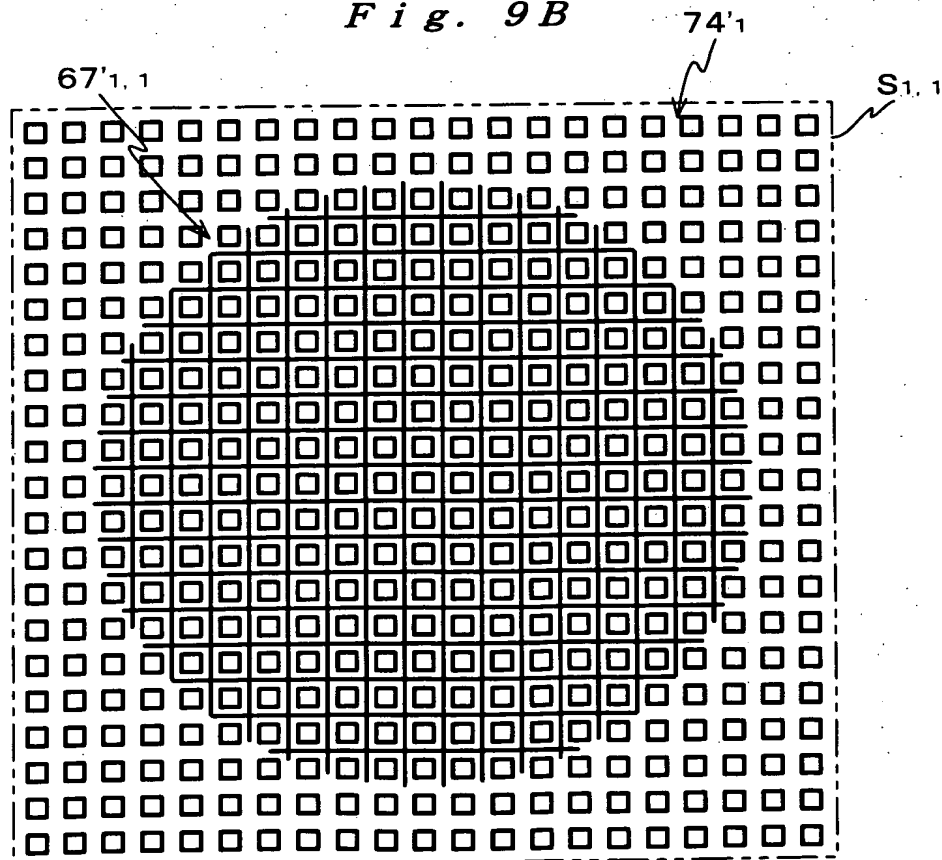


Fig. 10

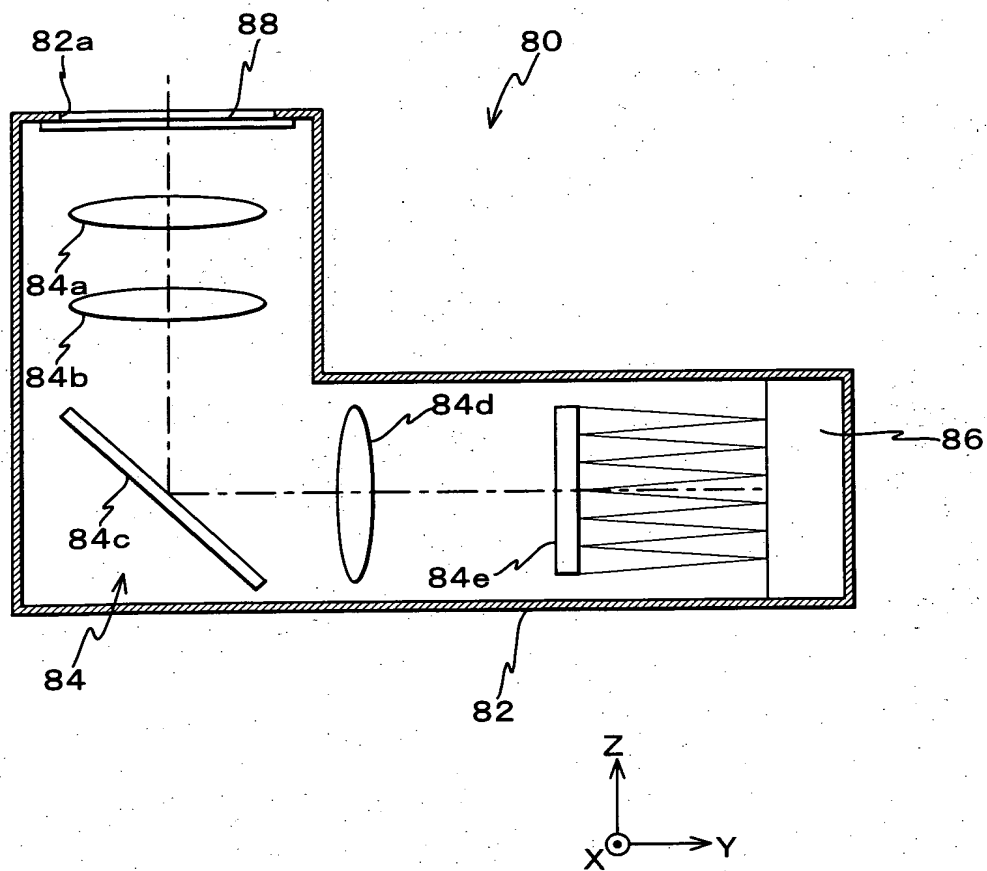


Fig. 11A

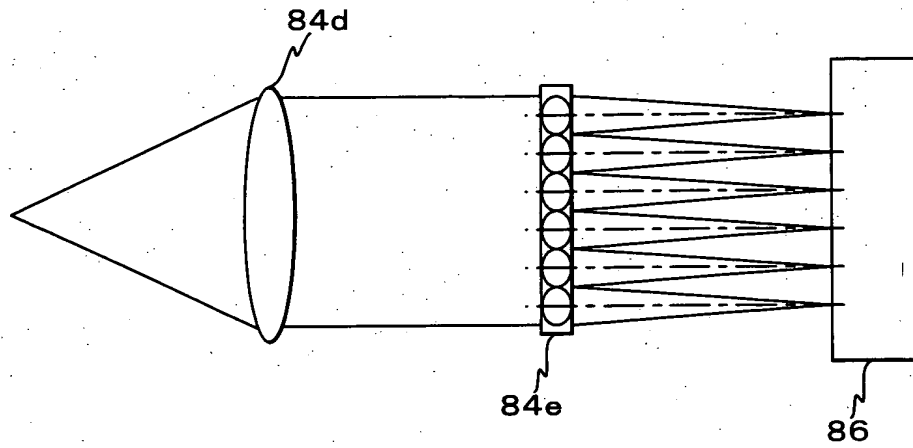


Fig. 11B

